

AALTO-YLIOPISTON TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Ville Nissinen

Pyörivän sylinterin halkaisijaeroprofiilin mittaaminen

Diplomityö

Espoo, 12. maaliskuuta 2010

Valvoja: Ma. professori Jari Juhanko

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Jani Hakola, Metso Paper Oy

AALTO-YLIOPISTON TEKNILLINEN KORKEAKOULU Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta AS-koulutusohjelma		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: <u>Ville</u> Justus Nissinen			
Työn nimi: Pyörivän sylinterin halkaisijaeroprofiilin mittaaminen			
Sivumäärä: 78	Päiväys: 12.3.2010	Julkaisukieli: suomi	
Professori: Koneensuunnittelu		Professuurikoodi: Kon-41	
Työn valvoja: ma. prof. Jari Juhanko			
Työn ohjaaja: DI Jani Hakola			
<p>Tiivistelmä:</p> <p>Tämän työn tavoitteena on kehittää menetelmä sylinterimäisen kappaleen halkaisijaeroprofiilin mittaamiseksi. Menetelmää on tarkoitus käyttää paperikoneen telan halkaisijaprofiilin muuttumisen seuraamiseen tuotanto-olosuhteissa ja koneen käydessä. Kyseiset olosuhteet asettavat rajoituksia menetelmälle.</p> <p>Työssä käydään läpi muotomittausten perusteita ja eri menetelmiä sylinterimäisen kappaleen halkaisijaprofiilin mittaamiseksi. Rainan poikittaisprofiilin muodostumiseen vaikuttavat seikat paperikoneessa sekä eri paperilajit ja telojen muotovirheiden vaikutus niihin on myös selostettu.</p> <p>Kirjallisuusselvityksessä esitetään eri menetelmiä, joilla sylinterimäisen kappaleen halkaisijaprofiili on mahdollista mitata. Annettujen vaatimusten ja tuotanto-olosuhteiden asettamien rajoitusten perusteella esitetyistä menetelmistä parhaiten käytäntöön soveltuvaksi menetelmäksi todettiin halkaisijan mittaaminen kolmella säteittäisesti asemoidulla etäisyysanturilla. Anturiryhmä on kiinnitetty sylinterin pituussuuntaiseen päistään tuettuun lineaarijohteeseen, jolloin sylinterin halkaisijaeroprofiili voidaan mitata liikuttamalla anturiryhmää sylinterin pituussuunnassa.</p> <p>Menetelmästä on rakennettu simulointimalli, jolla käytännön mittaustilannetta pystytään simuloimaan. Simulointimallilla on tutkittu eri virhelähteiden vaikutusta lopulliseen mittaustarkkuuteen. Tutkittavat virhelähteet olivat lineaarijohteen ja mittakaaren erilaiset mekaaniset epätarkkuudet, antureiden mittauseräpätarkkuus sekä mitattavan telan liike mittauksen aikana.</p> <p>Simulointimallilla saatujen tulosten mukaan menetelmällä pystytään kompensoimaan useimmat virhelähteet mittaustuloksista kokonaan. Tutkituista virhelähteistä lineaarijohteen taipuma ja antureiden mittaustarkkuus todettiin ainoiksi merkittäviksi virhelähteiksi. Tavoitteeksi asetettu yhden mikrometrin mittaustarkkuus on simulointien perusteella kuitenkin saavutettavissa.</p>			
Asiasanat: sylinteri, halkaisija, telamittaus			

AALTO UNIVERSITY SCHOOL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY Faculty of Electronics, Communications and Automation Degree programme of Automation and Systems Technology		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: <u>Ville</u> Justus Nissinen			
Title: Measurement of diameter difference profile of a rotating cylinder			
Number of pages: 78	Date: March 12 th 2010	Language: Finnish	
Professorship: Machine design		Code: Kon-41	
Supervisor: professor Jari Juhanko			
Instructor: Jani Hakola, M. Sc. (Tech.)			
<p>Abstract:</p> <p>The aim of this master's thesis is to develop a system for measurement of diameter difference profile of a cylindrical object. The purpose of the system is in-situ monitoring of the changes in the diameter profile of a paper machine roll.</p> <p>The basics of surface measurements and several different methods for measuring the diameter profile of cylinder are presented in the literature survey. The formation of the cross direction profile of the paper web in a paper machine is described. Different paper grades and their sensitivity for roll geometry errors are also described.</p> <p>The most feasible method is selected on the grounds of the specifications and the restrictions set by the production environment. The method consists of three displacement sensors on an arc-shaped frame mounted on a linear motion guide alongside the cylinder. The diameter difference profile is obtained by moving the measuring arc along the cylinder.</p> <p>The sensitivity of the measurement method for various error sources is studied using a simulation model of the actual measurement system. The model is used to generate the sensor signals when different sources of error are present. The effect of mechanical imprecisions of the linear guide and the measuring arc, sensor imprecision and the movement of the cylinder are studied.</p> <p>The results of the simulation show that the measuring system is able to separate most of the error sources from the measurement. Deflection of the linear guide and imprecision of the sensors were the only significant sources of error. The requirement for the precision of measurement was one micrometer, which is attainable according to the simulations.</p>			
Keywords: cylinder, diameter, roll measurement			

ALKUSANAT

Aloittaessani opinnot lähes kymmenen vuotta sitten en osannut aavistakaan mitä opiskelu tulisi pitämään sisällään. Joukkoon on mahtunut monia täysin ylivoimaisilta tuntuneita asioita, mutta yhtä paljon myös riemullisia osaamisen hetkiä. Tämän työn tekeminen on ollut suurin yksittäinen ponnistus, ja valmistumisen tuoma tunne on todella hyvä.

Haluan kiittää työn ohjaajaa Jani Hakolaa ja Metsoa tämän diplomityön tekemisen mahdollistamisesta. Työn valvoja Jari Juhanko on ansainnut suuret kiitokset korvaamattomasta opastuksesta työn aikana. Kiitokset koko koneensuunnittelun laboratorion väelle mitä mainioimmasta työympäristöstä.

Pitkäaikainen opiskelu- ja työkaverini Valtteri Sonninen ansaitsee kiitokset hyvien ja huonojen hetkien jakamisesta. Kiitokset myös perheelleni kaikesta tuesta ja avusta elämän aikana. Kaikkein erityisin kiitos Marille parhaasta mahdollisesta seurasta työajan ulkopuolella.

Ville Nissinen

Espoossa 12.3.2010

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Abstract.....	3
Alkusanat	4
Sisällysluettelo	5
Symboliluettelo	7
Sanastoa	9
1. Johdanto.....	10
1.1 Tausta.....	10
1.2 Tutkimusongelma	10
1.3 Tutkimuksen tavoite.....	11
1.4 Rajaukset.....	11
1.5 Tutkimusmenetelmät.....	12
2. Kirjallisuuskatsaus	13
2.1 Telojen merkitys paperiradan poikittaisprofiilin muodostumisessa	13
2.1.1 Paperikoneen eri osien vaikutus rainan profiliin	14
2.1.2 Telojen taipuman kompensointi.....	20
2.1.3 Radan profiilin hallinta	22
2.2 Telan geometria.....	23
2.2.1 Telojen kulumismekanismit.....	23
2.2.2 Telojen käytönaikainen geometria	24
2.2.3 Muotomittausstandardit	25
2.3 Telan muodon mittausmenetelmiä.....	27
2.3.1 Halkaisijan ja ympyrämaisyyden mittaaminen	28
2.3.2 Mekaniikan epätarkkuuksien kompensointimenetelmät.....	30
2.3.3 Kolmen anturin menetelmä ympyrämaisyyden mittaamiseksi	32
2.3.4 Viiden anturin menetelmä sylinterimäisyyden mittaamiseksi	35
2.3.5 Kuuden anturin menetelmä kelkan satunnaisvirheiden poistamiseksi.....	36
2.3.6 Kuuden anturin menetelmä sylinterimäisyyden mittaamiseksi	41
2.3.7 Ympyrän kaaren sovitukseen perustuva halkaisijanmittausmenetelmä.....	42
2.3.8 Telamittalaitteet	44
2.4 Paperi	45
2.4.1 Täyte- ja lisäaineet	45
2.4.2 Paperin ominaisuudet.....	46
2.4.3 Paperi- ja kartonkilajit.....	49

3. Tutkimusmenetelmät	53
3.1 Mittausmenetelmän vaatimukset	53
3.2 Mittausmenetelmän valinta	53
3.3 Mittauksen signaalinkäsittely ja parametrit	55
3.4 Simulaatiomalli	56
3.5 Mittausmenetelmän simulointi.....	59
3.6 Halkaisijaeroprofiilin ja mittausvirheen laskeminen	61
4. Tulokset.....	63
4.1 Anturointi	63
4.2 Kelkan liikeradan epätarkkuuksien vaikutus	65
5. Johtopäätökset.....	68
5.1 Tulosten arviointi	68
5.2 Simulointimallin arviointi	71
5.3 Jatkotutkimuskohteet	72
6. Yhteenveto	73
Lähteet	75

SYMBOLILUETTELO

A	anturiryhmä A
a_n	Fourier-sarjan n . kerroin
B	anturiryhmä B
b_n	Fourier-sarjan n . kerroin
c_n	signaalin n painokerroin
D	telan todellinen halkaisijaprofiili
\hat{D}	telan mitattu halkaisijaprofiili
ΔD	telan todellinen halkaisijaeroprofiili
$\Delta \hat{D}$	telan mitattu halkaisijaeroprofiili
ΔD_i	telan halkaisijaeroprofiilin todellinen arvo mittauspisteessä i
$\Delta \hat{D}_i$	telan halkaisijaeroprofiilin mitattu arvo mittauspisteessä i
d	antureiden välinen etäisyys, mittausosaväli
$e_x(z_i)$	x -akselin suuntaisen translaation aiheuttama virhekomponentti
$e_{yaw}(z_i)$	x -akselin ympäri tapahtuvan rotaation aiheuttama virhekomponentti
e_{s_n}	kalibrointivirhetermi anturin n signaalissa s_n
$f(z, \theta)$	pinnan profiili z -akselin pisteessä z suunnassa θ
$f(z_i)_i$	pinnan diskretoitu profiili
i	indeksi
L	anturien etäisyyksien painotettu summa
L_n	anturin n etäisyys mittauskeskipisteestä
m_n	anturin n kulman diskreetin muodon kerroin
m_s	anturiryhmän differentiaalinen ulostulo
N	mittauspisteiden lukumäärä
n	indeksi, diskreetti kulma
P_n	xy -tason piste
p	mittauspisteiden välinen etäisyys

R	ympyrämäisyysprofiilin Fourier-sarja
$R(k)$	k . termi Fourier-sarjassa R
r	kappaleen ympyrämäisyysprofiili
r_0	kappaleen nimellishalkaisija
$r(\theta)$	kappaleen pinnan etäisyys sen keskipisteestä kulmassa θ
S	signaalin s Fourier-sarja
$S(k)$	k . termi Fourier-sarjassa S
s	anturisignaalien painotettu summa
s_n	anturin n antama signaali
\bar{s}_n	anturin n antaman signaalin kierroskohtainen keskiarvo
s_{nr}	anturin n antama signaali toisella mittauksella
t_a	suoran a kulmakerroin
x	x -koordinaatti, x -akseli
x_n	pisteen \mathbf{P}_n x -koordinaatti
$x(\theta)$	pyörimiskeskipisteen x -akselin suuntainen siirtymä pyörähdyskulmassa θ
y	y -koordinaatti, y -akseli
y_a	suoran a yhtälö
y_n	pisteen \mathbf{P}_n y -koordinaatti
$y(\theta)$	pyörimiskeskipisteen y -akselin suuntainen siirtymä pyörähdyskulmassa θ
z	z -koordinaatti, z -akseli
z_i	diskreetti z -koordinaatti
α	anturiryhmän A virhetermi
β	anturiryhmän B virhetermi
φ_n	anturin n ja horisontin välinen kulma
θ	kappaleen pyörähdyskulma z -akselin ympäri

SANASTOA

Halkaisija on määritelty vain täysin ympyrämaisille kappaleille. Ideaaliselta muodoltaan ympyrämaisten kappaleiden mittaamisessa puhutaan usein **keskimääräisestä halkaisijasta**, joka tarkoittaa eri pyörähdyskulmissa mitattujen halkaisijoiden keskiarvoa.

Halkaisijaeroprofiili tarkoittaa sylinterin poikkileikkausten halkaisijoiden erotusta, eli sylinterin halkaisijan vaihtelua sen pituussuunnassa. Halkaisijaeroprofiili voidaan mitata sylinterin eri pyörähdyskulmissa, mutta tässä työssä sillä tarkoitetaan keskimääräisten halkaisijoiden eroprofiilia. Paperikoneen telojen tapauksessa halkaisijaeroprofiilista voidaan käyttää nimitystä **CD-profiili**.

Halkaisijaprofiililla tarkoitetaan samaa kuin halkaisijaeroprofiililla, mutta halkaisijoiden absoluuttinen suuruus on tiedossa. Halkaisijaprofiilin toinen nimitys on **paksuusprofiili**.

Heitto tarkoittaa pyörivän kappaleen pinnan säteensuuntaista liikettä tietyssä tarkastelusuunnassa. Heitto sisältää siis kappaleen pinnan muotovirheen lisäksi sen omasta liikkeestä aiheutuvan virheen.

Ympyrämäisyys tai **ympyrämäisyysvirhe** on suure, joka ilmaisee kappaleen muodon poikkeamisen täydellisestä ympyrästä. Ympyrämäisyys voidaan määritellä usealla eri tavalla, joille yhteistä on kappaleen ympyrämäisyysprofiilin sovittaminen kahden samankeskisen ympyrän sisään. Kappaleen ympyrämäisyys on näiden kahden ympyrän säteiden erotus.

Ympyrämäisyysprofiili tarkoittaa ympyrämaisen kappaleen todellista muotoa. Telan poikkileikkauksesta puhuttaessa käytetään myös sanaa **MD-profiili**.

1. JOHDANTO

1.1 Tausta

Paperikoneen tehokkuutta on viime vuosikymmeninä kasvatettu sekä koneen leveyttä kasvattamalla että koneiden nopeuksia nostamalla. Jotta leveään koneen kapasiteetti pystyttäisiin tehokkaasti hyödyntämään, tulee paperin olla tasalaatuista koko koneen leveydeltä. Paperiradan poikittaissuuntaisten laatuvaihteluiden kontrollointi on siksi tärkeä osa nykyaikaista paperikonetta.

Paperimassa koostuu kuitujen lisäksi erilaisista lisäaineista ja täyteaineista, joilla paperin ominaisuuksia muutetaan haluttuun suuntaan. Lisäaineita lisätään paperiin verrattain pieniä määriä, ja niiden tarkoitus on parantaa valmistusprosessin toimivuutta ja vaikuttaa paperin ominaisuuksiin. Täyteaineita taas saattaa valmiissa paperissa olla huomattavan suuri osa. Niillä pystytään alentamaan raaka-ainekustannuksia ja vaikuttamaan lopputuotteen ominaisuuksiin. Täyteainepartikkelit ovat usein kovia ja särmikkäitä, minkä takia ne aiheuttavat paperikoneen osien kulumista. Kuluttavan vaikutuksen takia telojen pinnanlaatu muuttuu ja niiden halkaisija pienenee.

Kulumisen lisäksi telan käynnin aikaiseen muotoon vaikuttaa lämpötila ja lämpötilajakauma. Telan epähomogeenisen rakenteen takia lämpölaajenemisen vaikutus telan muotoon on epätasainen. Siksi telan halkaisijaprofiili muuttuu myös lämpötilan muuttuessa.

Telojen kulumisen koneen poikkisuunnassa on tyypillisesti epätasaista. Myös paperiradan reunan paikka vaihtelee, jonka takia telan reuna-alueilla halkaisijaerojen muodostuminen on merkittävää.

1.2 Tutkimusongelma

Paperi- ja jälkikäsitteilykoneiden yksikköprosesseissa on monta vaihetta, joissa radan profiilia voidaan säätää. Säädettäviä suureita ovat muun muassa rainan neliömassa, päällysteen neliömassa, kosteus, sileys ja tiheys. Radan mittaukset ja säädöt tapahtuvat sekä koneen suunnassa (*machine direction*, MD) että koneen poikkisuunnassa (*cross direction*, CD). MD-profiilin säätö on luonteeltaan aikaan sidottua,

ja CD-profiilin säätö paikkaan sidottua. Säädön tavoitteena on mahdollisimman tasalaatuinen lopputuote. Radan profiilin säätäminen vaikuttaa telojen kulumiseen. Ongelmana on telojen kulumisen seuraaminen. Mikäli telan halkaisijaeroprofiili pystytettäisiin mittaamaan ajonaikaisesti, olisi sen vaikutus paperirataan paremmin tiedossa ja radan profiilin säätö siten luotettavampaa.

Lisäksi telan yhteyteen kiinteästi tai siirreltävästi asennettavaa mittauslaitteistoa olisi mahdollista hyödyntää muussakin kunnonvalvonnassa, kuten telan pinnanlaadun mittaamisessa ja lopulta jopa telan kuntoa ylläpitävän hionnan ohjaamisessa.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Tämän diplomityön päätavoite on kehittää menetelmä telan halkaisijaeroprofiilin mittaamiseen hitaasti pyörivästä telasta. Tutkimuksessa selvitetään menetelmän soveltuvuus myös ajonaikaiseen mittaamiseen. Työn osatavoitteina on selvittää menetelmällä saavutettava mittauksen tarkkuus sekä laitteen mekaniikan ja antureiden tarkkuusvaatimukset.

Telojen toleranssivaatimukset heiton osalta ovat enintään viiden mikrometrin luokkaa, ja jo muutaman mikrometrin virhe aiheuttaa merkittäviä pintapaineen vaihteluita kalanterissa. Telojen hionnan yhteydessä käytettäviltä mittausmenetelmiltä edellytetään noin yhden mikrometrin tarkkuutta, ja kunnonvalvonnassa telamittausten tarkkuus on luokkaa 3-4 mikrometriä. Siten noin yhden mikrometrin tarkkuutta voidaan pitää kehitettävältä menetelmältä vaadittavana tarkkuutena.

1.4 Rajaukset

Mittauksessa käytettävälle anturiteknologialle rajoituksia asettavat teloissa käytettävät erilaiset pinnoitusmateriaalit. Tässä työssä ei kuitenkaan oteta kantaa mittauksessa käytettäviin antureihin, mutta menetelmän soveltuvuus eri materiaaleille ja anturiteknikoille otetaan huomioon.

Mahdollisen telansuuntaisen mittapalkin mekaaninen suunnittelu rajataan tämän työn ulkopuolelle. Palkin aiheuttama mittausepä-tarkkuus on kuitenkin mukana tarkastelussa. Telan ja mittalaitteiden värähtelyt, lämpötilan muutokset ja muut mittauksiin vaikuttavat olosuhteet huomioidaan mittausalgoritmin valinnassa, mutta niille ei kehitetä aktiivista kompensointia.

Ympyrämäisyysprofiilia tai muita telan muotoprofiileita ei tarvitse saada mitattua.

1.5 Tutkimusmenetelmät

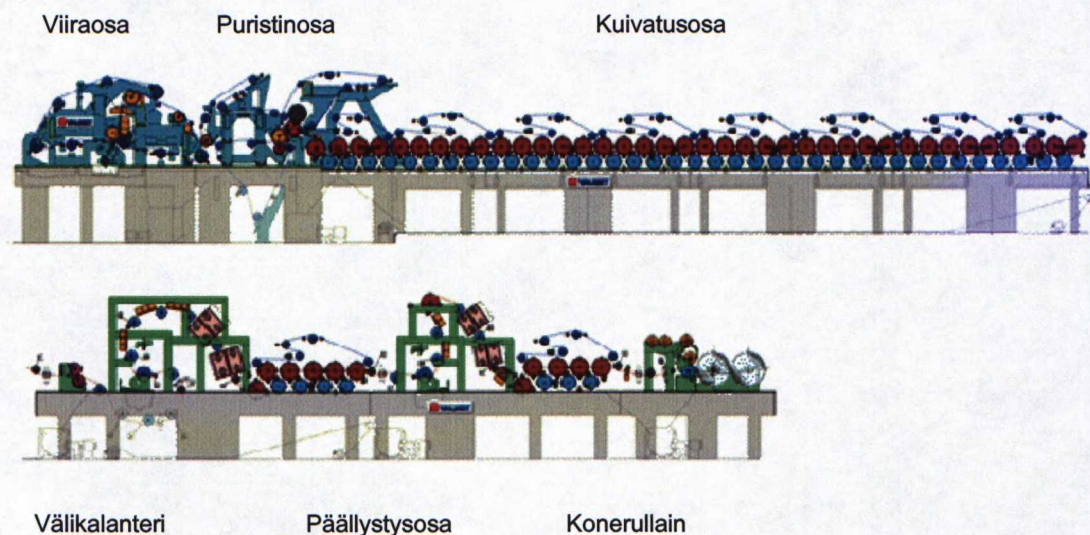
Tutkimusongelmaa lähestytään kirjallisuuskatsauksen avulla. Kirjallisuuskatsauksessa esitetään sylinterimäisten kappaleiden muodon mittaamiseen soveltuvat menetelmät. Lisäksi kirjallisuuskatsauksessa esitetään paperiradan poikittaisprofiilin muodostumiseen vaikuttavat tekijät paperinvalmistus- ja jälkikäsittelyprosesseissa.

Esitetyistä mittausmenetelmistä valitaan vaatimusmäärittelyjen perusteella sopivin menetelmä, josta rakennetaan simulointimalli. Simuloinnin perusteella selvitetään menetelmän mahdollinen soveltuvuus käytännön mittauksiin.

2. KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Telojen merkitys paperiradan poikittaisprofiilin muodostumisessa

Paperikoneen (kuva 1) toiminnan kannalta oleellisessa asemassa ovat sen telat. Teloilla on lukuisia eri tehtäviä, ja ne voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan niiden pääasiallisen tehtävän perusteella. Johtotelojen tehtävänä on paperirainan, viirojen tai huopien kannatus, kiristys, levitys ja kulun ohjaus. Prosessiteloiksi kutsutaan teloja, jotka osallistuvat rainanmuodostus-, vedenpoisto-, tai muuhun rainan käsittelyprosessiin. Prosessitelojen lukumäärä on vähäisempi johtoteloihin verrattuna, mutta niiden rakenne on usein monimutkaisempi ja vaatimukset ankarammat. Kaikkein suurinta mekaanista tarkkuutta edellytetään jälkikäsittelyn prosessiteloilta, kuten kalanteriteloilta. Jo muutaman mikrometrin virhe kalanteritelan paksuusprofiilissa tekee havaittavan jäljen rainaan. [18]



Kuva 1. Nykyaikaisen LWC-paperikoneen eri osat. [23]

Paperirainan poikittaissuuntaisen profiilin muodostumiseen vaikuttaa telojen lisäksi moni muu asia. Tässä luvussa käydään läpi paperikoneen eri osaprosessien vaikutus rainan profiiliin. Koska telojen taipumakompensointi on tärkeää monessa osaprosessissa, on siitä lopuksi oma lukunsa. Paperin mitattavat ominaisuudet on selitetty myöhemmin luvussa 2.4.2.

2.1.1 Paperikoneen eri osien vaikutus rainan profiiliin

Perälaatikko

Perälaatikon tehtävä on massasulpun levittäminen viiralle mahdollisimman tasaisesti koko koneen leveydeltä. Käytännössä tämä tapahtuu johtamalla massavirtaus kartion muotoiseen perälaatikon pituiseen kanavaan, joka jakaa virtauksen tasaisesti koneen levyiseen putkikimppuun. Putkikimpun jälkeen massa suihkutetaan viiralle koneen levyisen matalan suuttimen avulla. Perälaatikko on paperikoneen oleellinen osa neliömassaprofiilin muodostumisessa. [4]

Perälaatikkoon syötettävän massasulpun tasaisuus on myös tärkeä tekijä paperin formaation kannalta. Massasulpun laadunvaihtelun vaikutus rainan tasaisuuteen tapahtuu kuitenkin suhteellisen isossa skaalassa, joten sen vaikutus neliömassaan havaitaan lähinnä koneensuuntaisena vaihteluna.

Perälaatikossa pystytään säätämään massan jakautumista viiralle koneen poikkisuunnassa. 90-luvulle saakka säätö tehtiin kuivapään neliömassamittauksen perusteella perälaatikon suuttimen huuliaukkoa sopivista kohdin pienentämällä. Tällaisen säädön vaste on kuitenkin huono, koska virtausnopeuden lisäksi virtauksen suunta muuttuu, jolloin myös kuitujen orientaatio muuttuu.

Massasulppua paikallisesti laimentamalla voidaan neliömassan CD-profiilia säätää kuitujen orientaatiota huonontamatta. Tällöin suihkutusaikon koko ja muotoilu sekä suihkutussnopeus voidaan pitää tasaisena koko koneen leveydeltä. Laimentaminen tehdään yleensä putkikimppussa ennen suutinta lisäämällä kunkin putken virtaukseen sopiva määrä kiertovettä. [2, 33]

Viiraosa

Viiraosan tärkein tehtävä on poistaa vettä rainasta, jotta rainan siirto viiralta puristinosalle on mahdollista. Viiraosa myös parantaa rainan formaatiota ja vähentää flokkiintumista. Perinteisissä yksiviiraisissa paperikoneissa viira on vaakatasossa ja raina kulkee sen päällä. Vesi valuu viiran läpi tiivistäen massakerrosta. Suuremmat ajonopeudet mahdollistavissa kaksoisviirakoneissa raina kulkee kahden viiran välissä, jolloin vedenpoisto tehostuu ja paperin toispuolisuus vähenee täyteaineiden

levittyessä tasaisemmin rainan molemmille pinnoille. 80-luvulta lähtien on kehitetty monia erilaisia ratkaisuja viiraosan suorituskyvyn kasvattamiseksi. [33]

Kartonkikoneissa viiroja on usein kaksi tai kolme, joiden avulla kartongin paksuussuuntainen tiheysjakauma saadaan halutuksi. [37]

Puristinosa

Puristinosan tehtävä on jatkaa vedenpoistoa ennen rainan siirtämistä kuivatusosalle. Tämä tapahtuu siirtämällä raina kahden huovan väliin ja puristamalla sitä mekaanisesti, jolloin vettä siirtyy huopaan. Märkäpuristin voi olla myös yksihuopainen, jolloin paperirata kulkee huovan ja tavallisen telan välistä. Märkäpuristuksella on merkittävä vaikutus lopputuotteen laatuun seuraavilta osin:

- toispuoleisuus
- sileys ja pintarakenne
- huokoisuus/imukyky
- tiheys ja paksuussuuntainen tiheysjakauma sekä
- jäykkyys

Märkäpuristuksessa on tapahtunut huomattavaa teknistä kehittymistä viimeisen 20 vuoden aikana. Etenkin leveillä paperikoneilla rainan kosteusprofiilin hallinta on erityisen tärkeää. Kosteutta voidaan hallita vyöhykkeisiin jaetuilla höyrytyslaatikoilla tai lämmittämällä rainaa infrapunasäteilyllä. Lisäksi vyöhykesäädettävillä teloilla pystytään vaikuttamaan puristusvoimaprofiiliin. Profiilin säädössä huomattavaa on, että parhaan lopputuloksen saamiseksi puristusvoimaprofiilin ei useinkaan tule olla täysin suora. [27, 33]

Kuivatusosa

Kuivatusosan tehtävä on jatkaa paperiradan vedenpoistoa lopulliseen kosteuteen saakka. Yleisimmin se tapahtuu lämmitettyjen telojen avulla haihduttamalla.

Paperin laadun tulisi pysyä korkeana myös korkeilla haihdutustehoilla. Koneen poikkisuuntainen haihtumisprofiili on erityisen tärkeä, koska kosteuden vaihtelu paperiradassa aiheuttaa laatuvaihtelua lopputuotteeseen ja heikentää ajettavuutta. [19]

Kuivuessaan paperi kutistuu. Lopputuotteen laadun ja tuotannon tehokkuuden kannalta kutistuminen pyritään estämään venyttämällä. Tätä estettyä kutistumista kutsutaan jähmettyneeksi venymäksi. Jähmettynyt venymä parantaa paperin ominaisuuksia muun muassa lisäämällä paperin kimmokerrointa ja vetolujuutta. Paperin kuidut ovat yleensä orientoituneet enemmän koneensuuntaisesti kuin poikkisuuntaisesti. Koska kuidut kutistuvat enemmän paksuussuunnassa kuin pituussuunnassa, on rainan koneensuuntainen kutistuminen siten pienempää kuin poikkisuuntainen.

Telaryhmien välistä nopeuseroa kontrolloimalla koneensuuntainen kutistuma pystytään estämään, tai paperirataa voidaan jopa venyttää. Koneen poikkisuuntaista radan kutistumista pystytään jonkin verran rajoittamaan kuivatusviiroilla sekä imuteloilla ja -laatikoilla. Tällöin kutistumista estävät rainan ja kuivatusviiran väliset kitkavoimat sekä rainan tasossa vaikuttavat leikkausvoimat telojen välissä. [37]

Poikkisuuntainen kutistuminen pystytään kokonaan estämään jenkkisylinterillä kuivatessa. Myöskään Condebelt-menetelmällä, jossa paperirata kuivataan kahden metallisen hihnan välissä, ei rata kutistu poikkisuunnassa.

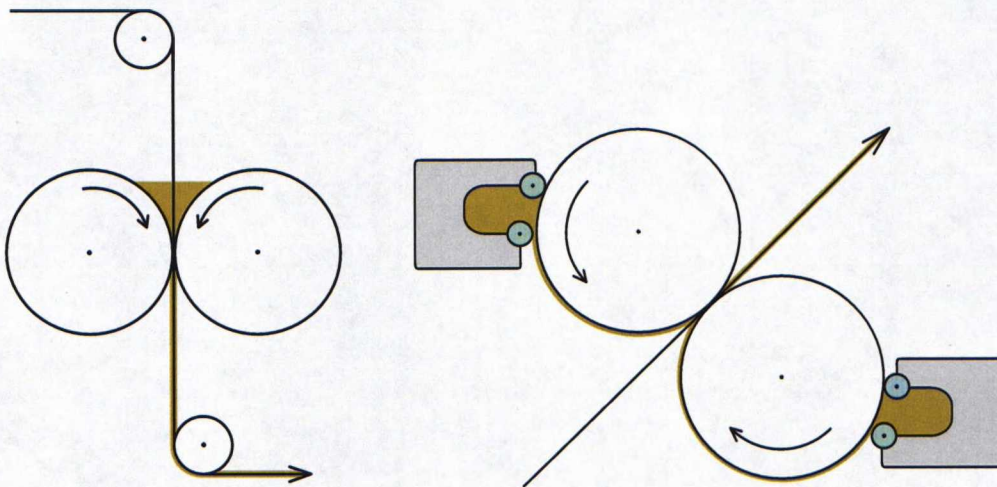
Kutistuminen on suurempaa radan reunoilla kuin keskellä, minkä takia neliömassa kasvaa radan reunoilla enemmän kuin keskellä. Tämä kutistumisprofiili vaikuttaa moniin muihin poikittaisprofiileihin ja on siksi tärkein kuivatuksessa syntyvistä poikittaisprofiileista. Kutistumisprofiili täytyy huomioida rainanmuodostuksessa neliömassaprofiilia säädettäessä. [19]

Radan kosteusprofiilia voidaan säätää profiloitavalla kosteussuutinpalkilla, joka sijoitetaan yleensä kuivatusosan loppupäähän. Kuivatusosan jälkeisessä jälkikäsitelyssä saavutetaan tasainen lopputulos, kun rainan kosteusprofiili on tasainen. Yleisesti ottaen kuivatus onnistuu parhaiten kun paperirata on kuivatusosaan tullessaan oikein profiloitu sekä poikki- että koneensuunnassa.

Uudenaikaisemmilla kuivatusmenetelmillä, kuten induktio-, mikroaalto- tai infrapunakuivatuksella pystyttäisiin kuivaustehoa helposti profiloimaan. [19]

Pintaliimaus

Pintaliimauksessa paperin tai kartongin pintaan lisätään liimaa, jonka tarkoituksena on parantaa paperin pinalujuutta, jäykkyyttä, pölyämättömyyttä, absorptio-ominaisuuksia ja lujuutta. Pintaliiman applikoivaa laitetta kutsutaan liimapuristimeksi. Yksinkertaisin liimapuristin on lammikkoliimapuristin, jossa paperiraina kulkee kahden telan välistä, joiden välissä on lammikkona liimaliuosta. (kuva 2). Lammikkoliimapuristimessa liima tunkeutuu syvälle paperiin, ja liiman määrää paperissa voidaan säädellä liimaliuoksen kuiva-ainepitoisuutta muuttamalla.



Kuva 2. Vasemmalla lammikkoliimapuristimen ja oikealla filminsiirtoliimapuristimen toimintaperiaate.

Filminsiirtoliimapuristin sallii suuremmat ajonopeudet kuin lammikkoliimapuristin. Filminsiirtoliimapuristimessa liima levitetään ensin telojen pinnalle ohueksi kalvoksi, jonka jälkeen liima siirretään telan pinnasta paperin pintaan. Filminsiirtoliimapuristimia on monenlaisia, ja varsinkin liiman levittämiseen telan pinnalle on useita menetelmiä. Useimmiten liimaa levitetään teloille runsaasti, ja suurin osa kaavitaan pois telansuuntaisella uritetulla sauvalla. [25]

Päällystys

Paperin päällystysten tavoitteena on parantaa sen ulkonäköä ja painettavuusominaisuuksia. Päällystyksessä käytettävät aineet voivat olla erilaisia pigmenttejä, sideaineita, vahoja ja muoveja. Päällystysmenetelmiä on lukuisia, mutta pääasiassa päällystystapahtuma voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: applikointiin, tasoitukseen ja kuivatukseen.

Yleisin pigmenttipäällystysmenetelmä on teräpäällystys. Tyypillinen teräpäällystysmenetelmä on sivelytelapäällystys, jossa applikointi tapahtuu rainan alapinnalle päällystepastassa uivan telan avulla. Päällysteen tasoitus tapahtuu kaapimalla rainan pinta terällä eli kaavarilla. Tästä menetelmästä on useita eri variaatioita. Teräpäällystyksessä päällysteen määrää säädetään joko kaavinterän paperirainaan kohdistavaa voimaa muuttamalla tai terän ja rainan välistä kulmaa muuttamalla. Ilmajarjapäällystyksessä kaavinterän tilalla on ilmasuihku.

Nykyään on olemassa myös filminsiirtopäällystimiä, joiden toimintaperiaate on samanlainen kuin filminsiirtoliimapuristimilla. Myös rainaa koskettamattomia spray-päällystimiä on käytössä.

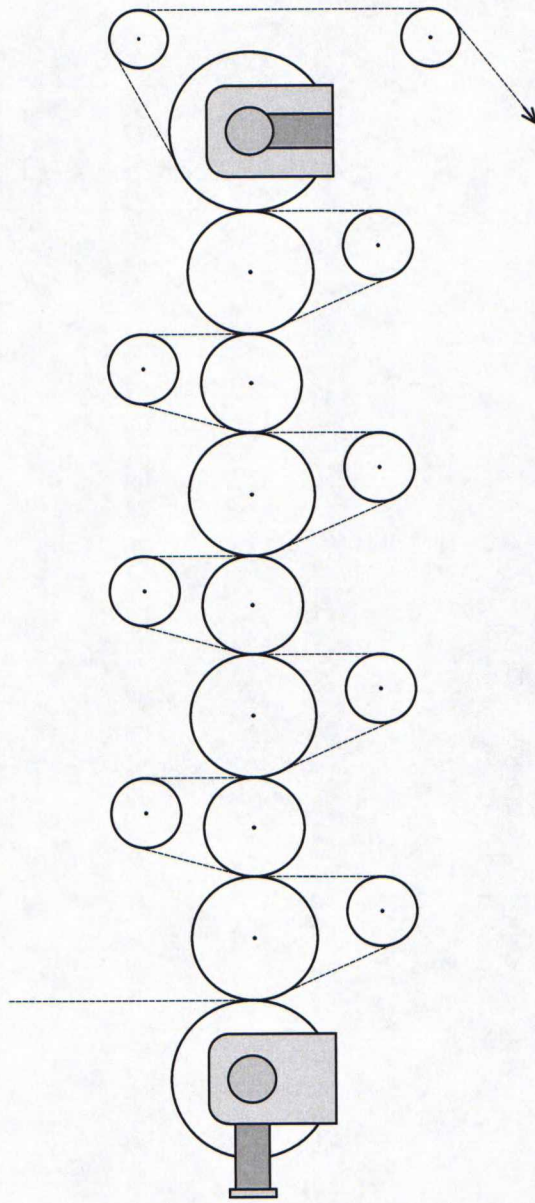
Päällysteen kuivatus tapahtuu useassa eri vaiheessa. Infrapuna- ja ilma kuivatus sekä näiden yhdistelmät ovat yleisimmin käytössä olevat menetelmät.

Päällysteen neliöpainon poikkiprofiilin säätäminen on mahdollista. Teräpäällystyksessä säätö tapahtuu terän puristusvoimaa vyöhykkeittäin säätämällä. Filminsiirtopäällystimestä säädetään vastaavasti sauvakaavaria. Myös päällysteen kuivatuksessa on usein käytössä vyöhykkeittäin säädettävät kuivaimet. [25]

Kalanterointi

Kalanteroinnissa paperi kulkee kahden yhteenpuristetun samansuuntaisen telan välistä. Telat puristavat paperirataa syvyysuunnassa kasaan, jolloin paperin pinta tasoittuu ja siliää. Viivamaista aluetta, jossa puristus tapahtuu kutsutaan nipiksi.

Usein ainakin toinen nipin teloista on lämmitetty termotela. Kovakalanterissa molemmat telat ovat kovia, kun taas soft-kalanterissa toinen teloista on päällystetty pehmeällä materiaalilla. Monitelakalanterissa (kuva 3) teloja on useampi kuin kaksi, ja ne on usein pinottu päällekkäin, jolloin yhdellä telalla voidaan muodostaa useampia nippejä. Monitelakalanteria, jossa kova ja pehmeä tela vuorottelevat, kutsutaan superkalanteriksi. Kalanteri voi olla osa paperikonetta, jolloin puhutaan konekalanterista, tai kalanterointi voidaan suorittaa erillisessä jälkikäsittelyprosessissa, jolloin kalanteri on varustettu on auki- ja kiinnirullaimilla.



Kuva 3. Monitelaisen pystykalanterin toimintaperiaate.

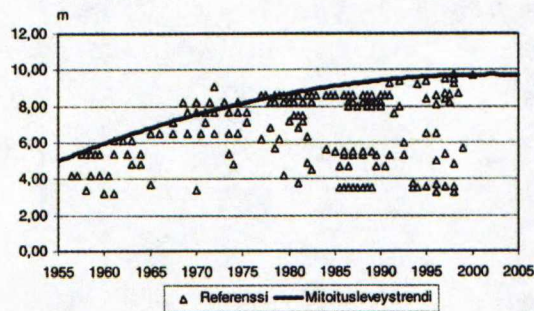
Kalanteroinnissa paperi puristuu kasaan, eli sillä voidaan vaikuttaa paperin paksuuteen ja tiheyteen. Paperirata myös levenee jonkin verran. Kovakalanterointi tasoittaa paperin paksuuden, jolloin tiheysjakauma saattaa jäädä epätasaiseksi. Soft-kalanteroinnissa tilanne on päinvastainen. Kalanteroinnissa paperissa olevia virheitä pystytään siis vähentämään kompensoimalla niitä toisilla virheillä. Paperin tasainen paksuusprofiili on tärkeää rullattavuuden ja painettavuuden kannalta.

Liian suuri nippipaine aiheuttaa paperiin läpikuultavia läikkiä, kun taas liian pieni nippipaine jättää paperin pinnan huokoiseksi, mikä huonontaa painojälkeä.

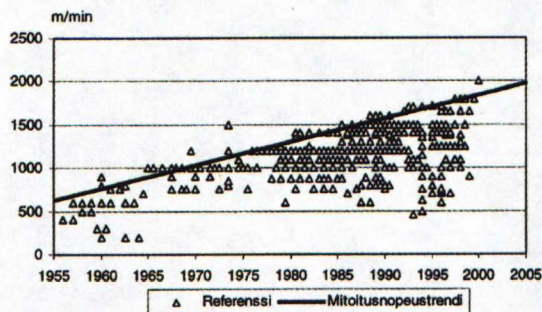
Kalanteroinnin lopputulokseen vaikuttaa nippipaineen lisäksi moni tekijä, kuten termotelan lämpötila sekä paperin lämpötila ja kosteus. Paperin formaation ja pinnoitteen neliöpainon tulee olla mahdollisimman tasainen, jotta paperi puristuisi kasaan tasaisesti. Kalanteroinnin onnistumiseen vaikuttaa siis koko aiempi tuotantoprosessi. [16, 30]

2.1.2 Telojen taipuman kompensointi

Kun teloja puristetaan yhteen, ne taipuvat. Puristusvoimien lisäksi myös huopa- ja imuvoimat vaikuttavat telojen taipumiseen. Taipuminen vaikeuttaa halutunlaisen nippipaineprofiilin aikaansaamista. Nykyaikaisten leveiden paperikoneiden (kuva 4) telojen pituus on tehnyt taipuman hallinnasta entistä haastavampaa. Koneiden nopeuden nosto (kuva 5) on muutenkin lisännyt telojen mekaanisia vaatimuksia. Tämän takia telojen taipuman kontrollointiin on vuosikymmenien aikana kehitetty lukuisia eri menetelmiä. [2]



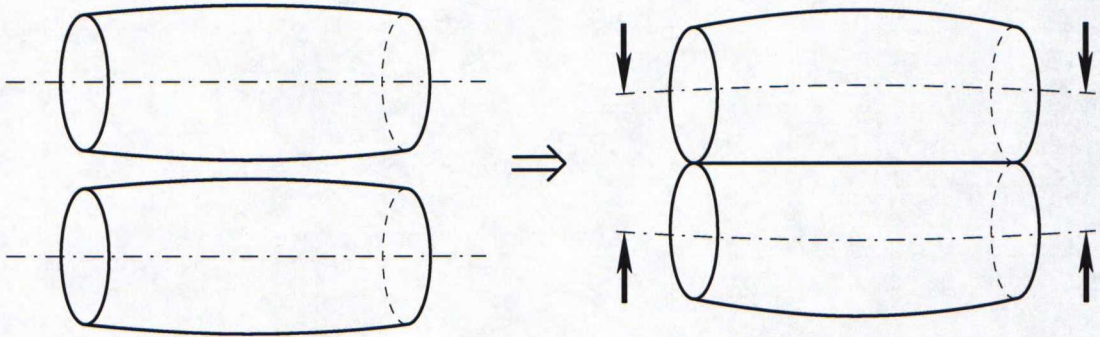
Kuva 4. Käyttöönottettujen paino- ja kirjoituspaperikoneiden leveyden kehitys. [37]



Kuva 5. Käyttöönottettujen paino- ja kirjoituspaperikoneiden nopeuden kehitys. [37]

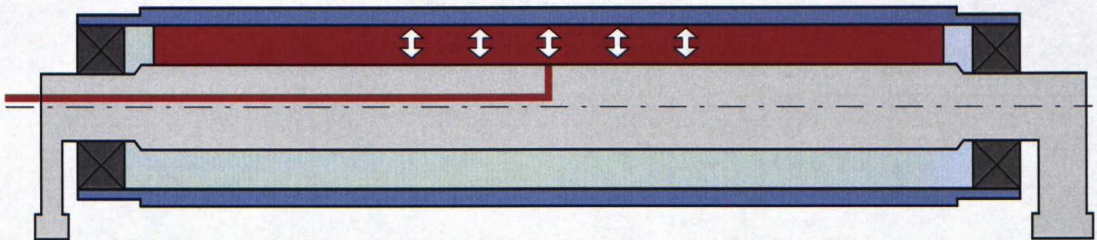
Yksinkertainen keino telan taipuman kompensoimiseksi on mykevöinti eli bombeeraus (*crowning*). Bombeerattuun telaan on työistetty tarkoituksella halkaisijavaihtelua siten, että telan ollessa käyttöasennossa sen taipuma kompensoi

nippipaineprofiilin suoraksi (kuva 6). Bombeeraus on käytännössä aina positiivinen, jolloin telan halkaisija on keskiosassa suurempi kuin päädyissä.



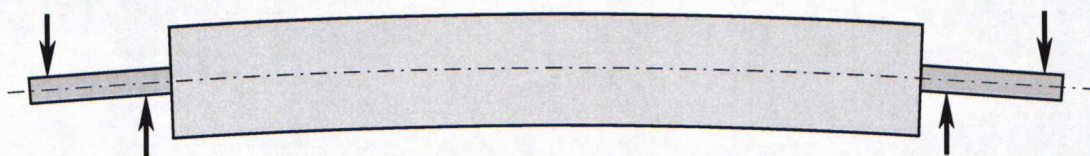
Kuva 6. Positiivisesti bombeerattu telapari.

Kiinteällä bombeerauksella varustettuja teloja voidaan käyttää vain tietyllä nippipaineella, koska nippipaineen muuttuessa telan taipuma muuttuu ja paineprofiili ei ole enää halutun kaltainen. Tämän takia on kehitetty menetelmiä bombeerauksen säätämiseksi. Yksinkertaisimmillaan telan sisällä on hydraulisesti aikaansaatu paine, jota muuttamalla telan pullistumista voidaan säätää (kuva 7). Tämä ei aina ole riittävä keino tasaisen profiilin aikaansaamiseksi, koska pullistuman aiheuttama halkaisijaprofiilin muoto ei välttämättä aikaansaa halutunlaista nippipaineprofiilia. Lisäksi bombeeratun telan halkaisijavaihtelun aiheuttama kehänopeuksien ero telan keski- ja päätyosissa aiheuttaa huovan kulumista ja rainan vaurioitumista. [2]



Kuva 7. Tela, jossa säädettävä bombeeraus.

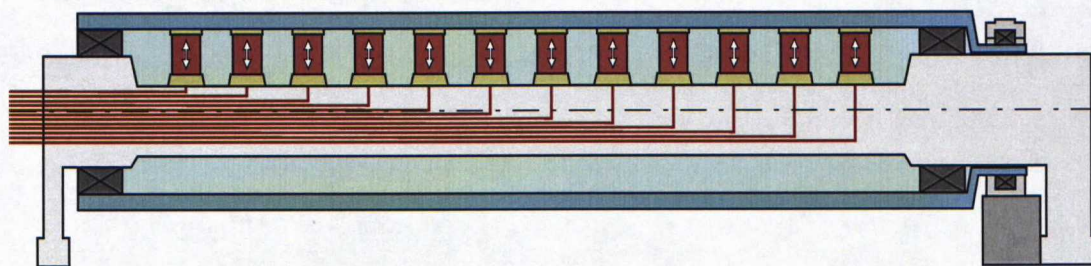
Telan taipumaa pystytään säätämään myös päätytappeja kuormittamalla, jolloin kyseessä on niin sanottu säädettävä vastamomenttitela (kuva 8). Tätä menetelmää on kuitenkin käytetty lähinnä bombeerausvirheiden kompensointiin, koska telan vääntäminen päätytapeista käsin aiheuttaa liian suurta rasitusta laakeroinnille ja päätylaipoille. [18]



Kuva 8. Säädettävä vastamomenttitela.

Vaikka taipuma pystyttäisiinkin kokonaan kompensoimaan, saattaa telassa olla paikallisesti kuluneempia ja siten halkaisijaltaan pienempiä kohtia. Myös kasvaneet vaatimukset tuotantokapasiteetin osalta ovat aiheuttaneet tarpeen kehittää menetelmiä nippipaineprofiilin säätöön vyöhykkeittäin. Vyöhykesäätö voidaan toteuttaa lämpölaajenemista hyödyntäen säätämällä telan lämpötilaa vyöhykkeittäin. Lämpötilaprofiilin säätöön käytetään yleensä induktiolämmittimiä tai ilma- tai höyrysuuttimia. Tällainen halkaisijaprofiilin säätö aiheuttaa omat ongelmansa telan epätasaisen lämpötila- ja kosteusprofiilin sekä muodonmuutosten hitauden takia. [18]

Nykyaikainen vyöhykesäädettävä tela koostuu pyörivästä vaipasta, jonka sisällä on staattinen akseli. Vaippa on tuettu akseliin kiinnitetyillä hydraulisilla liukukenkätoimilaitteilla, joiden vaippaan kohdistamaa kuormitusta pystytään muuttamaan (kuva 9). Ensimmäisissä aktiivisella taipumasäädöllä varustetuissa teloissa oli muutama vyöhyke, ja uusimmissa teloissa profilointi voidaan tehdä jopa vain 60 mm välein asennetuilla toimilaitteilla. Nykyaikaisessa paperikoneessa vyöhykesäädettäviä teloja on koneen lähes joka osassa, mutta erityisen tärkeässä asemassa ne ovat märkäpuristuksessa ja kalanteroinnissa. [16, 41]



Kuva 9. Taipumakompensoitu tela, jossa vyöhykesäätö.

2.1.3 Radan profiilin hallinta

Kuten edellä on käynyt ilmi, radan poikittaisprofiiliin koneen rullauspäässä vaikuttaa lukuisat tekijät lähes kaikissa prosessin osissa perälaatikosta alkaen.

Höyrytyslaatikoita, lämmittimiä, vyöhykesäädettäviä teloja ja muita profiiliin vaikuttavia muuttujia on entistä enemmän. Tärkeään osaan ovatkin nousseet automaattiset säätöjärjestelmät, jotka hallitsevat kaikki radan profiiliin vaikuttavat tekijät. Uusien paperikoneiden lisäksi myös modernisoitaviin koneisiin on saatavilla koko radan profiilisäädön hallitsevia automaatiojärjestelmiä, jotka auttavat tasalaatuisen lopputuotteen ja aiempaa nopeampien ylösajojen saavuttamisessa. [16, 37]

2.2 Telan geometria

Telan todellinen muoto poikkeaa käytännössä aina sen ideaalisesta muodosta. Tähän on monia syitä, jotka käydään läpi tässä luvussa. Lisäksi telan muotovirheiden tolerointiin on olemassa standardi, josta on esitetty tämän työn kannalta tärkeät osat.

2.2.1 Telojen kulumismekanismit

Kun kaksi pintaa liikkuvat toisiaan vasten, tapahtuu niissä kulumista. Kulumisen ja siitä seuraava materiaalihukka voi mikrotasolla tapahtua neljällä eri tavalla: abrasiivisesti, adhesiivisesti, väsymällä tai tribokemiallisen reaktion kautta. Käytännössä kulumisen tapahtuu yleensä useammalla kuin yhdellä mekanismilla samanaikaisesti.

Adhesiivisessa kulumisessa kuluva pinnasta tarttuu materiaalia kuluttavan kappaleen pintaan. Abrasiivisessa kulumisessa kova pinta uurtaa pehmeämpää pintaa irrottaen partikkeleita siitä. Väsymiskulumisessa kappaleen pinnankarheuden ulokkeet deformatuvat plastisesti riittävän monta kertaa, jolloin pinnasta irtaantuu partikkeleita väsymismurtumien seurauksena. Tribokemiallinen kulumisen liittyy metallikappaleiden pinnalla olevaan oksidikerrokseen ja siihen liittyviin kemiallisiin ilmiöihin.

Eroosio tarkoittaa kulumista, jossa ainetta poistuu kappaleen pinnasta kiinteiden tai nestemäisten partikkulien törmäysten seurauksena. Kulumismekanismi on tällöin pääasiassa abraasio, mutta eroosioon liittyy myös väsymiskulumista ja tribokemiallisia ilmiöitä. Kalanterissa tapahtuva kulumisen on pääasiassa eroosiota, ja kulumisen on sitä suurempaa mitä enemmän kalanteroitavassa paperilaadussa on täyteaineita. [21, 40]

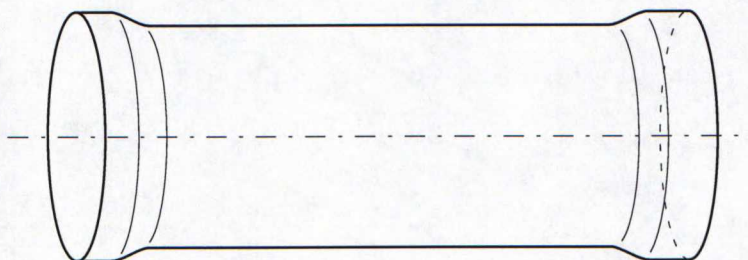
2.2.2 Telojen käytönaikainen geometria

Kalanterin nippipaine on yksi merkittävimmistä kalanteroinnin tulokseen vaikuttavista muuttujista. Paineen vaihtelua koneen suunnassa aiheuttavat lähinnä erilaiset värähtelyilmiöt. Koneen poikkisuunnassa tapahtuvaan paineen vaihteluun on monia syitä, ja se aiheuttaa yleensä paljon merkittävämpiä ongelmia kuin koneen suuntaiset painevaihtelut. [30]

Telan käytönaikainen muoto poikkeaa siihen hiotusta muodosta usein merkittävästikin. Merkittävimpiä muodonmuutosten aiheuttajia ovat:

- rainan kuluttava vaikutus
- lämpölaajeneminen
- muut dynaamiset tekijät kuten keskipakoisvoiman aiheuttamat kuorimuodonmuutokset

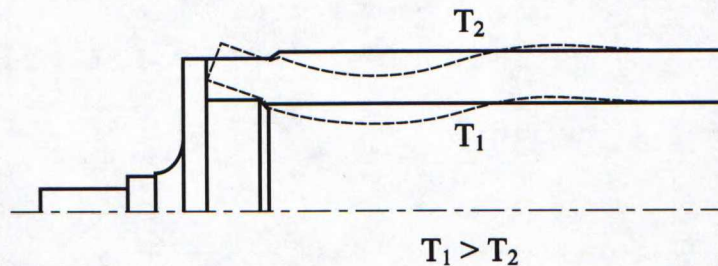
Rainan kuluttava vaikutus on epätasaisinta telan päädyissä, koska rainan reunan paikka vaihtelee. Se aiheuttaa telan päätyihin kuvassa 10 havainnollistetun halkaisijavaihtelun.



Kuva 10. Rainan reunan paikan vaihtelun aiheuttama telan paksuusprofiilin muutos.

Etenkin kovanippisillä kalantereilla lämpötilan muutokset ovat yleisin syy profiilivirheisiin. Teräksisessä halkaisijaltaan yhden metrin telassa yhden asteen lämpötilan muutos aiheuttaa 10 mikrometrin halkaisijan muutoksen, joten kyseessä on varsin merkittävä tekijä. Usein kalanterissa käytetään lämmitettyjä teloja, jolloin paperirata vie lämpöä pois telan pinnasta. Tämä aiheuttaa itsekorjaavan ilmiön telan halkaisijaprofiiliin, koska lämmönsiirto telalta rainaan on korkeamman nippipaineen takia tehokkaampaa halkaisijaltaan suuremmissa kohdissa. Kalanterointi onkin huomattavan vaikeaa mikäli telan ja paperin lämpötilaero on päinvastainen. [30]

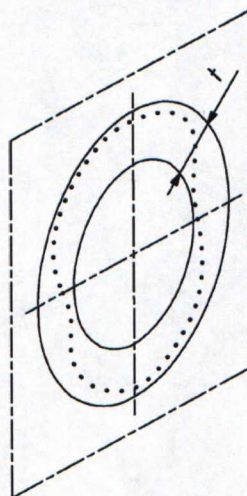
Telojen lämmitystavasta johtuen telan sisä- ja ulkopinnoilla vallitsee yleensä lämpötilaero. Se aiheuttaa telan päätyihin termisiä jännityksiä, jotka saattavat synnyttää *oxbow*-ilmiönä tunnetun muodonmuutoksen (kuva 11) telan päätyihin. [30]



Kuva 11. Telan sisä- ja ulkolämpötilojen erosta aiheutuva *oxbow*-ilmiö.

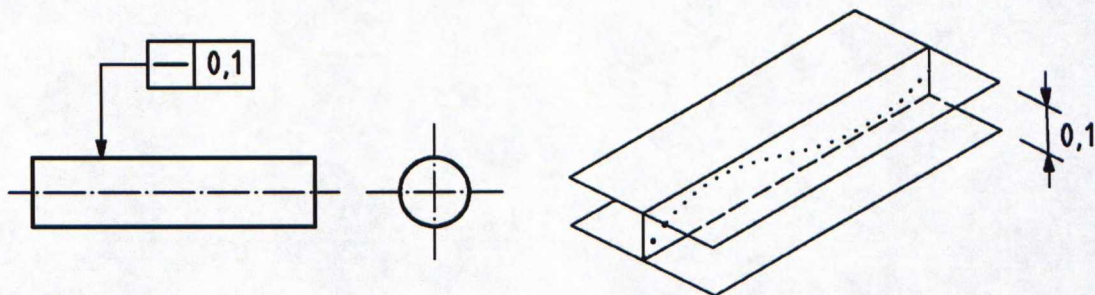
2.2.3 Muotomittausstandardit

Eurooppalainen ISO-standardi [38] määrittelee geometriset toleranssit joilla sylinterimäisen kappaleen muotoa voidaan toleroida. Kappaleen ympyrämaisyys tarkoittaa sen poikkileikkauksen muodon poikkeamista täydellisestä ympyrästä. Ympyrämaisyystoleranssin vaatimuksena on, että kappaleen ympyrämaisyysprofiilin on mahduttava kahden samankeskisen ympyrän väliin, joiden säteittäinen etäisyys on toleranssin suuruinen (kuva 12). Sylinterimäisten kappaleiden tapauksessa kappaleen jokaisen poikkileikkauksen on toteutettava kyseinen ehto. Toisin sanoen telan ympyrämaisyystoleranssi ei ota kantaa telan käyryyteen tai pyörimisakselin epäkeskeisyyteen.



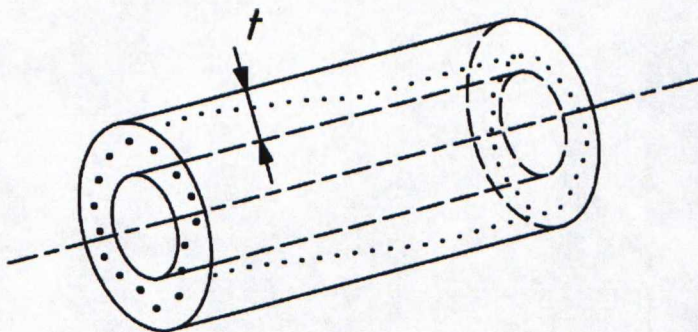
Kuva 12. Ympyrämaisyystoleranssin määritelmä, kun toleranssin suuruus on t . Kappaleen todellinen pinta on merkitty pisteviivalla ja yhtenäisellä viivalla piirretyt ympyrät ovat toleranssialueen rajat. [38]

Sylinterimäisen kappaleen on pinnan suoruustoleranssi tarkoittaa sitä että sylinterin jokaisen pituussuuntaisen sivuviivan on oltava kahden yhdensuuntaisen tason välissä, joiden keskinäinen etäisyys on toleranssin suuruinen (kuva 13). Suoruustoleranssi ei siis ota kantaa kappaleen ympyrämuotoisuuteen.



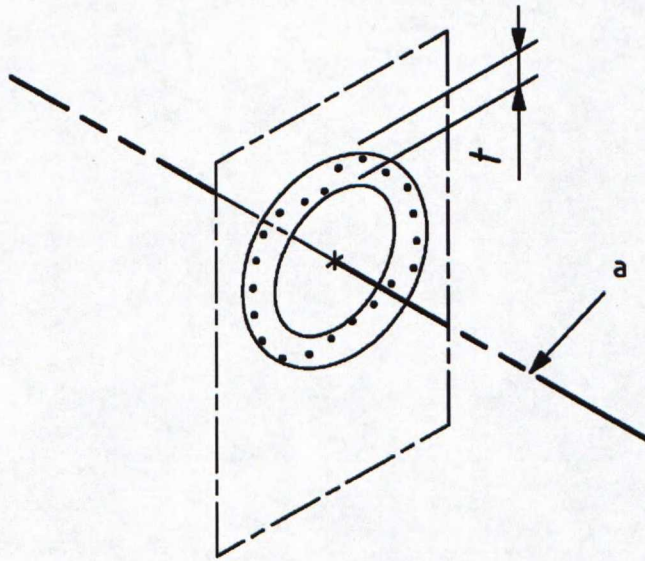
Kuva 13. Kyseisen sylinterin kaikkien mitattujen sivuviivojen on oltava kahden yhdensuuntaisen tason välissä, joiden etäisyys toisistaan on 0,1. [38]

Lieriömuotoisuustoleranssia voi ajatella ympyrämuotoisuus- ja pinnan suoruustoleranssien yhdistelmänä. Lieriömuotoisuustoleranssialuetta rajoittaa kaksi sama-akselista lieriöpintaa, joiden säteittäinen etäisyys on toleranssin suuruinen (kuva 14). Tässä diplomityössä lieriömuotoisuudella ja sylinterimäisyydellä tarkoitetaan samaa asiaa.



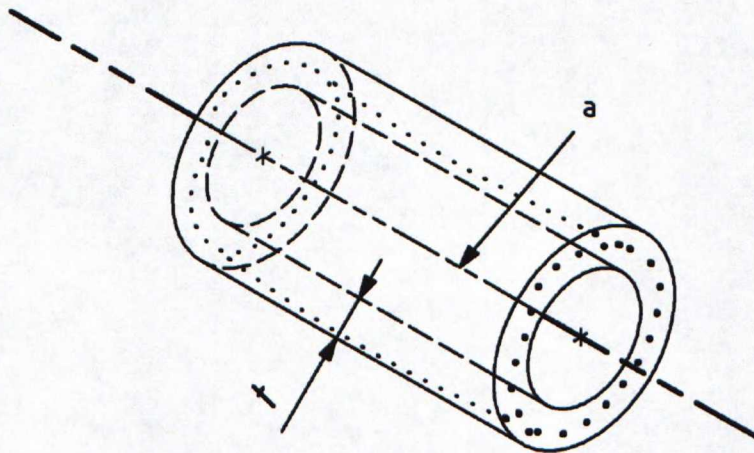
Kuva 14. Kuvassa lieriömuotoisuustoleranssin suuruus on t . [38]

ISO-standardin mukaan säteisheittotoleranssin toleranssialuetta rajoittavat ympyrät, jotka ovat samankeskisiä määritellyn perusakselin kanssa (kuva 15). Säteisheittotoleranssi voidaan määritellä myös vain tietyn säteen suuntaan.



Kuva 15. Säteisheittotoleranssin määritelmä. Toleranssin suuruus on t , ja perusakseli on a . [38]

Kokonaissäteisheittotoleranssi eroaa sylinterimäisyystoleranssista samalla tavoin kuin säteisheittotoleranssi ympyrämäisyydestä. Kokonaissäteisheittotoleranssissa toleranssialuetta rajoittavat ympyrät ovat samankeskisiä määritellyn perusakselin kanssa (kuva 16).



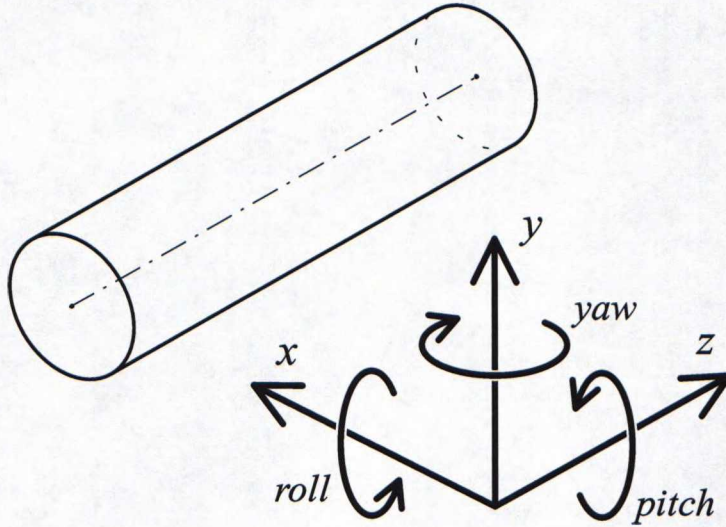
Kuva 16. Kokonaissäteisheittotoleranssin määritelmä, kun toleranssin suuruus on t ja perusakseli a . [38]

2.3 Telan muodon mittausmenetelmiä

Tämän luvun alussa on perustietoa halkaisijan mittaamisesta sekä mekaanisten epätarkkuuksien kompensointimenetelmistä. Tämän jälkeen esitellään kirjallisuudesta löytyviä eri monipistemenetelmiä, joilla sylinterimäisen kappaleen muodosta

on mahdollista mitata vähintään halkaisija. Lisäksi lopussa kerrotaan lyhyesti teollisuudessa käytössä olevista telamittalaitteista.

Menetelmien esityksissä käytettävä koordinaatisto on esitetty kuvassa 17.

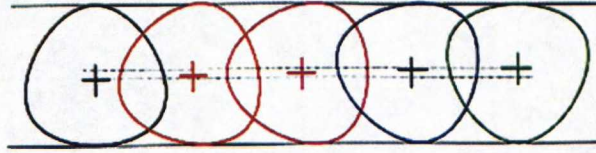


Kuva 17. Mittausalgoritmien esittämisessä käytettävä koordinaatisto suhteessa mitattavaan kappaleeseen.

Eri akselien ympäri tapahtuville kierroille on olemassa myös lähinnä ilmailu-sanastossa esiintyvät suomenkieliset termit kallistuminen, nyökkääminen ja kääntyminen. Tässä työssä käytetään englanninkielisiä termejä *roll*, *pitch* ja *yaw*.

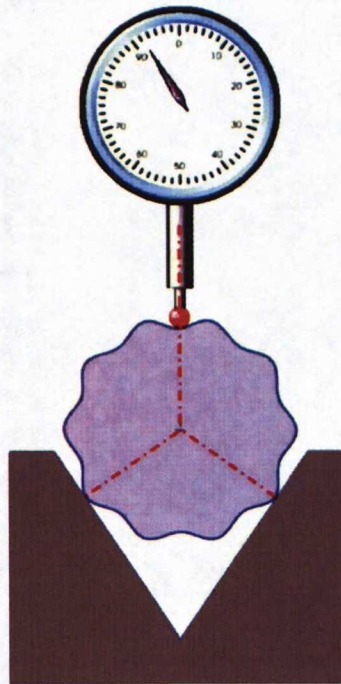
2.3.1 Halkaisijan ja ympyrämaisyyden mittaaminen

Pienikokoisen kappaleen halkaisija voidaan mitata yksinkertaisesti esimerkiksi työntömittaa käyttämällä. Mikäli kappale ei ole täydellisen ympyrämainen, tämä ns. kahden pisteen menetelmä voi antaa harhaanjohtavan kuvan kappaleen efektiivisestä halkaisijasta. Mitattaessa halkaisija kappaleen eri pyörähdyskulmissa, jää kappaleen pyörimiskeskusteen liike havaitsematta, jolloin ympyrämaisyydevirheen parittomat aaltomuodot suodattuvat pois. Tätä harmonista suodattumista on havainnollistettu kuvassa 18. [28]

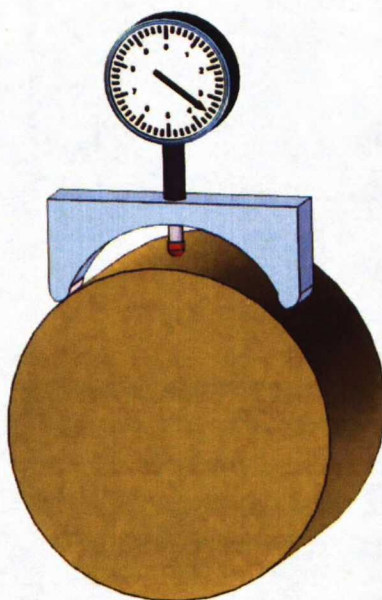


Kuva 18. Halkaisijamittaus ei erota kappaleen pyörimiskeskusteen liikettä kappaleen geometriavirheestä. [17]

Vastaavanlainen menetelmä kappaleen ympyrämäisyysvirheen mittaamiseen on ns. uiva kolmipistemenetelmä, jossa mitattava kappale asetetaan V:n muotoiseen rakoon, ja kappaleen pyöriessä sen heitto mitataan yhdellä anturilla kappaleen päältä (kuva 19). Tässäkin tapauksessa osa aaltomuodoista suodattuu pois. Samaa periaatetta soveltavia kädessä pidettäviä mittalaitteita on myös saatavilla. Kuvassa 20 esitetty mittalaite painetaan kiinni sylinteriin, ja sen keskellä oleva anturi mittaa kappaleen halkaisijan. [9]



Kuva 19. Uiva kolmipistemenetelmä. [9]



Kuva 20. Suurten kappaleiden halkaisijan mittaaminen kädessä pidettävällä mittalaitteella. [9]

Pienten kappaleiden muodon mittaamiseen käytetään yleensä koordinaattimittalaitetta (*coordinate measuring machine*, CMM). Tyypillisessä koordinaattimittalaitteessa on kolme tarkasti työstettyä ortogonaalista akselia ja yksi kosketukseen reagoiva anturi. Anturi tuodaan kosketukseen mitattavan kappaleen kanssa, jolloin kappaleen pinnan koordinaatit yhdessä pisteessä saadaan luettua.

Pyörähdysymmetristen kappaleiden mittaamiseen voidaan käyttää ympyrämäisyysmittalaitetta, jossa mitattava kappale kiinnitetään pyörivälle alustalle. Kappaleen ympyrämäisyysprofiili pystytään mittaamaan yhdellä anturilla, koska ympyrämäisyysmittalaitteessa kappaleen pyörimiskeskipeite ei liiku. [9]

2.3.2 Mekaniikan epätarkkuuksien kompensointimenetelmät

Suurten kappaleiden pinnanmuotojen mittaamisessa ongelmana on se, että mitattavan kappaleen ja mittaavan anturin välinen koordinaatisto ei ole tunnettu, mikä johtuu käytettävän mekaniikan epätarkkuuksista. Ongelman ratkaisuksi on esitetty lukuisia monipistemenetelmiä, joissa mittaus suoritetaan useammalla kuin yhdellä anturilla. Näissä menetelmissä edellytyksenä on, että antureiden sijainti toisiinsa on tunnettu. Käytännössä teloja mitattaessa tämä tarkoittaa sitä, että mittakehän, johon anturit kiinnitetään, tulee olla mekaanisesti tarkka. Mittakehän

kiinnitys sitä kuljettavaan johteeseen sen sijaan ei tarvitse olla tarkka, koska johteen aiheuttamat virheet pystytään kompensoimaan anturisignaalien analysoinnilla.

Mitattavan pinnan normaalin suuntainen virhe on tyypiltään ensimmäisen kertaluokan virhe. Ensimmäisen kertaluokan virhe summautuu suoraan esimerkiksi etäisyysanturin antamaan signaaliin, ja yleisesti ottaen sen aiheuttama virhe on merkitykseltään suurin. Toisen kertaluokan virhe tarkoittaa anturin virheellisen mittauskulman aiheuttamaa virhettä, ja sen merkitys mittaustulokseen on huomattavasti ensimmäisen kertaluokan virhettä pienempi.

Ensimmäisen kertaluokan virhe pystytään poistamaan mittaustuloksesta käyttämällä kahta anturia. Toisin sanoen, anturit asetetaan mittakelkalle kelkan kulkusuuntaan nähden perättäin, jolloin antureiden erosignaalin avulla saadaan kelkan translaation aiheuttama mittausvirhe poistettua. [28]

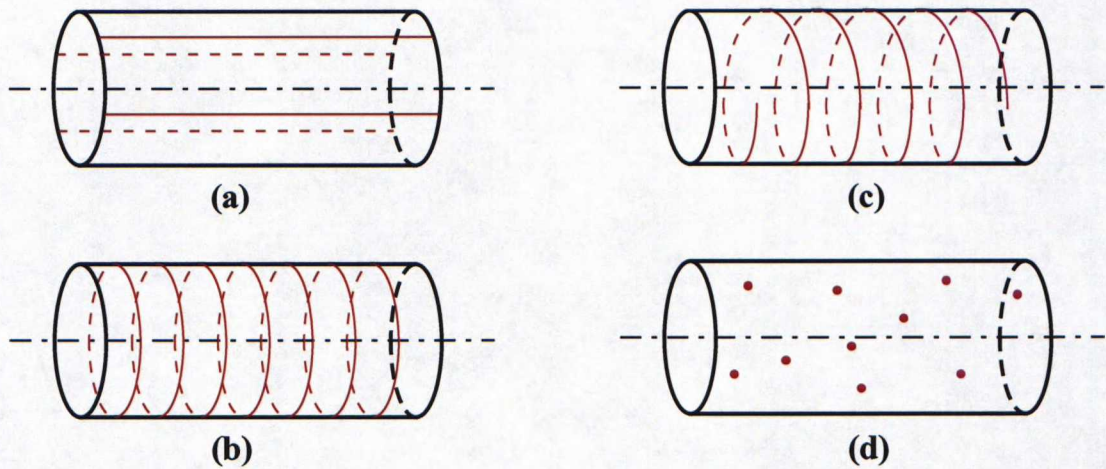
Vastaavasti toisen kertaluokan, eli mittakelkan kallistelujen aiheuttama virhe voidaan poistaa kolmea anturia käyttämällä. Kolmen anturin antamasta mittausdatasta pystytään pinnan muotoprofiili laskemaan useammallakin eri menetelmällä. Näitä menetelmiä hyödyntäviä mittausjärjestelmiä on esitetty kirjallisuudessa runsaasti. [10, 11, 22, 32, 39]

Kolmea anturia käytettäessä anturit täytyy kalibroida referenssilevyn avulla. Referenssilevyn suoruusvirhe aiheuttaa kalibrointiin virheen, joka aiheuttaa mittaukseen virheen. Kalibroitivirheen suuruus on mittausalgoritmista johtuen verrannollinen mitattavan profiilin pituuden neliöön. Tämän takia kolmeen telan suunnassa perättäiseen anturiin perustuva menetelmä on käytännössä käyttökelvoton paperikoneen leveyden suuruusluokkaa olevilla pituuksilla (kuva 26) [12]. Luvussa 2.3.5 esitellään menetelmä, jossa kalibroitivirhe poistetaan käyttämällä kahta kolmen anturin yksikköä. Kalibroitivirhe voidaan kompensoida myös mittakelkan liikkeitä autokollimaattorin avulla seuraamalla. [44]

Heiton toteavien antureiden lisäksi vastaavanlaisia usean anturin menetelmiä on kehitetty myös pinnan kulmaa mittaaville antureille [13] sekä lähinnä pienikokoisten kappaleiden tapauksessa myös pinnan kaarevuutta mittaaville antureille [6].

Anturien lukumäärästä riippumatta mittausmenetelmässä täytyy valita mitattava muotoviiha. Eri tapauksia on havainnollistettu kuvassa 21. Käytännössä kaikki

virheiden kompensointimenetelmät perustuvat johonkin näistä neljästä muotoviivan mittauksesta, tai niiden yhdistelmään. [40]



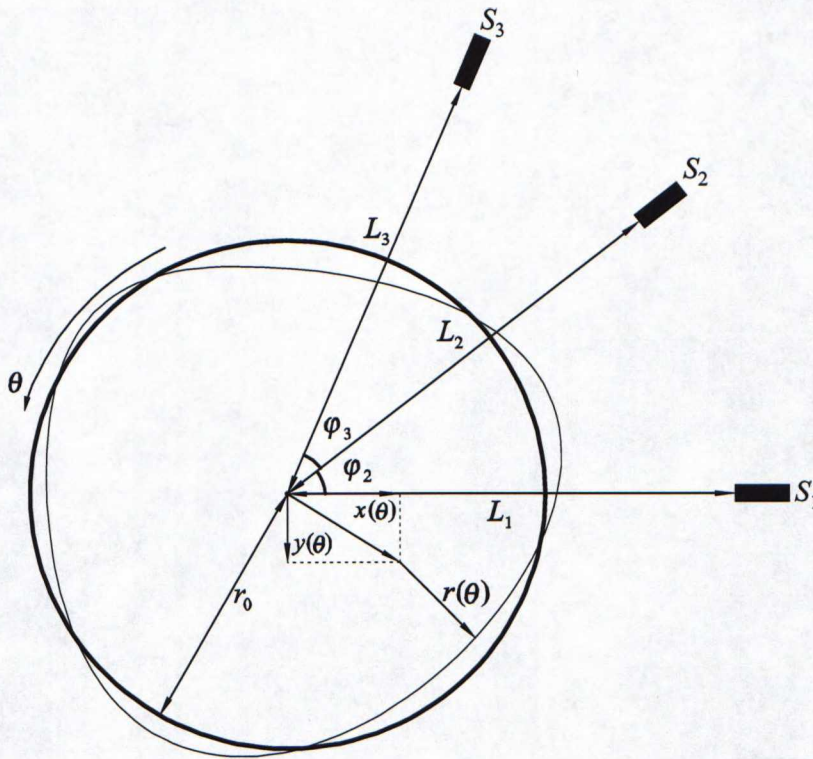
Kuva 21 (a)-(d). Eri lähestymistavat sylinterimäisyyden mittaamiseen. a-kohdassa mitataan sylinterin sivuviivat, b-kohdassa leikkausprofiilit, c-kohdassa sylinterin ympärille kiertynyt spiraali ja d-kohdassa piste kerrallaan.

Useissa sylinterin mittaamismenetelmissä ei ole nähty tarpeelliseksi hakea ratkaisua mittakelkkaa kuljettavan johteen taipumisesta aiheutuvan mittausrvirheen kompensointiin. Tämä johtuu siitä, että käytännön mittaustilanteissa johde pystytään tukemaan koko matkaltaan tukevasti, jolloin taipumasta aiheutuva virhe on merkityksettömän pieni. Lisäksi laboratorio-olosuhteissa johde on pystytty sijoittamaan mitattavaan kappaleeseen nähden vapaasti siten, että johteen taipuman aiheuttama virhe on mahdollisimman pieni. Paperikoneen käytönaikaisen mittauksen ollessa kyseessä johde on usein mahdollista kiinnittää vain päistään, jolloin johde taipuu. Johteen mahdolliset sijoituspaikat on myös rajalliset. Mittakelkan virhe-
liikkeiden seurantaan on kuitenkin olemassa menetelmiä, jotka on yleisesti ottaen tarkoitettu varsin lyhyille johteille. Lisäksi ne vaativat monimutkaista anturointia. [14, 44]

2.3.3 Kolmen anturin menetelmä ympyrämaisyyden mittaamiseksi

Mikäli kappaleen pyörimiskeskipe pysyisi paikallaan koko mittauksen ajan, olisi kappaleen ympyrämaisyydsprofiilin mittaaminen yhdellä anturilla mahdollista. Usein kappaleen kiinnitys aiheuttaa pyörimiskeskipeen liikettä kappaleen pyöriessä, minkä takia ympyrämaisyyden mittaamiseen tarvitaan useampia antureita. [17]

Kappaleen ympyrämäisyysprofiili on mahdollista mitata Ozono-menetelmällä [31], jossa mittaus suoritetaan kolmella säteittäisesti sijoitetulla anturilla kuvan 22 mukaisesti. Kappaleen pyörrähtaessä yhden kierroksen, saadaan mittaussignaalien painotetusta summasignaalista kappaleen likimääräinen ympyrämäisyysprofiili. Ideana kolmen anturin käyttämisessä on se, että kahdella anturilla pystytään havaitsemaan kappaleen keskipisteen liike ja kolmannella kappaleen pinnan liike.



Kuva 22. Ozono-menetelmä kappaleen ympyrämäisyysprofiilin mittaamiseksi.

Osa aaltomuodoista kuitenkin suodattuu pois. Suodattumiseen vaikuttaa valitut anturikulmat. Numeerisen taajuusanalyysin perusteella [20] kulmat ovat ihanteellimmillaan 0° , 38° ja 67° . Menetelmä on todettu käytännössä toimivaksi, kun mitattavan profiilin aaltoluku kierrosta kohti on alle 35. [42]

Ozono-menetelmällä tehtävä ympyrämäisyysmittaus voidaan yhdistää halkaisijan approksimointiin pienimmän neliösumman menetelmällä [43]. Sylinterin tapauksessa mittauspisteiden asemointi sylinterin suhteen vaatii kuitenkin tarkkuutta, koska mittaustulos on herkkä tietyille anturiryhmän mekaanisten epätarkkuuksien aiheuttamille satunnaisvirheille.

Kappaleen ympyrämäisyysprofiliä kuvaava funktio $r(\theta)$ on jaksollinen, joten se voidaan ilmaista siniaaltojen summana muodossa

$$r(\theta) = r_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (1)$$

jossa vakiokomponentti r_0 on kappaleen pienimmän neliösumman säde. Kolmen säteittäisen anturin anturisignaalit $s_1(\theta)$, $s_2(\theta)$ ja $s_3(\theta)$ ovat siten

$$s_1(\theta) = L_1 - r(\theta) - x(\theta), \quad (2)$$

$$s_2(\theta) = L_2 - r(\theta + \varphi_2) - \cos \varphi_2 x(\theta) - \sin \varphi_2 y(\theta) \text{ ja} \quad (3)$$

$$s_3(\theta) = L_3 - r(\theta + \varphi_3) - \cos \varphi_3 x(\theta) - \sin \varphi_3 y(\theta). \quad (4)$$

Painotettu summasignaali $s(\theta)$ voidaan ilmaista anturisignaalien lineaarikombinaationa

$$s(\theta) = s_1(\theta) + c_2 s_2(\theta) + c_3 s_3(\theta). \quad (5)$$

Sijoittamalla summasignaaliin kaavat 2-4 saadaan

$$s(\theta) = L_1 + c_2 L_2 + c_3 L_3 - r(\theta) - c_2 r(\theta + \varphi_2) - c_3 r(\theta + \varphi_3) - (c_2 \cos \varphi_2 + c_3 \cos \varphi_3 + 1)x(\theta) - (c_2 \sin \varphi_2 + c_3 \sin \varphi_3)y(\theta) \quad (6)$$

Koska painokertoimet c_1 , c_2 ja c_3 ovat vapaasti valittavia vakioita, valitaan ne niin, että pyörimiskeskiön liike ei näy summasignaalissa. Asetetaan siis ehdot

$$c_2 \cos \varphi_2 + c_3 \cos \varphi_3 + 1 = 0 \text{ ja} \quad (7)$$

$$c_2 \sin \varphi_2 - c_3 \sin \varphi_3 = 0, \quad (8)$$

ja ratkaistaan:

$$c_2 = \frac{-\sin \varphi_3}{\sin(\varphi_3 + \varphi_2)} \quad (9)$$

$$c_3 = \frac{-\sin \varphi_2}{\sin(\varphi_3 + \varphi_2)} \quad (10)$$

Asetetaan vielä $L = L_1 + c_2 L_2 + c_3 L_3$. Nyt kaava 6 saa muodon

$$s(\theta) = L - r(\theta) - c_2 r(\theta + \varphi_2) - c_3 r(\theta + \varphi_3) \quad (11)$$

Nähdään, että $s(\theta)$ riippuu vain kappaleen ympyrämaisyysofiilista $r(\theta)$.

Käytännössä signaali $s(\theta)$ on diskreetti. Anturikulmat voidaan ilmaista muodossa

$$\varphi_2 = 2\pi \frac{m_2}{N} \text{ ja } \varphi_3 = 2\pi \frac{m_3}{N}, \text{ jossa } N \text{ on signaalin näytteiden määrä kierrosta kohti ja}$$

m_2 ja m_3 kokonaislukuja. Diskretoituna kaava 11 saa siten muodon

$$s(n) = L - r(n) - c_2 r(n + m_2) - c_3 r(n + m_3) \quad (12)$$

Asetetaan $s'(n) = L - s(n)$, jolloin

$$s'(n) = r(n) + c_2 r(n + m_2) + c_3 r(n + m_3), \quad (13)$$

jonka diskreetti Fourier-muunnos on

$$S'(k) = R(k) * (1 + c_2 e^{-j2\pi m_2 k/N} + c_3 e^{-j2\pi m_3 k/N}). \quad (14)$$

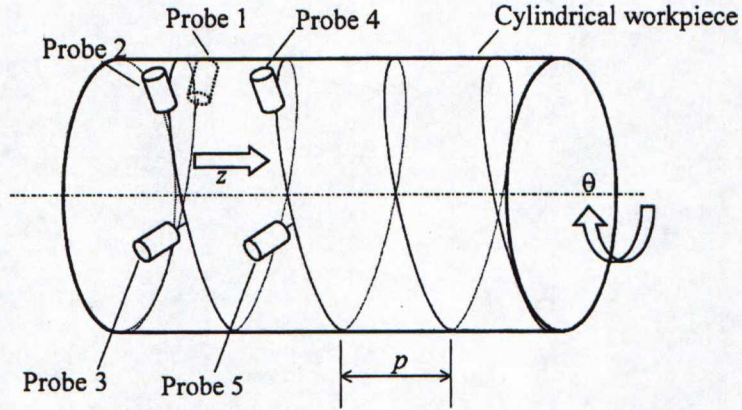
Ympyrämaisyysofiili $r(\theta)$:n vakiokomponentti r_0 on sama kuin Fourier-sarjan ensimmäinen termi $R(0)$. Asetetaan siis $k = 0$, jolloin $S'(0) = R(0) * (1 + c_2 + c_3)$, joten kappaleen säde

$$r_0 = \frac{L - S(0)}{1 + c_2 + c_3}. \quad (15)$$

2.3.4 Viiden anturin menetelmä sylinterimäisyyden mittaamiseksi

Endo et al ovat kehittäneet sylinterimäisten kappaleiden muotoprofiilin mittaamiseksi menetelmän, jossa käytetään viittä anturia spiraalin muotoon telan ympärille asennettuna kuvan 23 mukaisesti [8]. Anturit asennetaan samalle lineaari-johteelle, jonka nopeus on tahdistettu sylinterin pyörimisnopeuteen siten, että kukin anturi mittaa samaa spiraalinmuotoista rataa sylinterin pinnalla. Mittauksessa pystytään hyödyntämään edellä mainittuja menetelmiä peräkkäisten anturien antamien signaalien avulla laskettavasta pinnanmuodosta. Anturien mittauskulmat

ovat vapaasti valittavissa. Tutkimuksessa käytetyt anturikulmat olivat 0° , 65° , 118.7° , 156.5° ja 218.8° , joilla saavutettiin optimaalisin taajuusvaste.

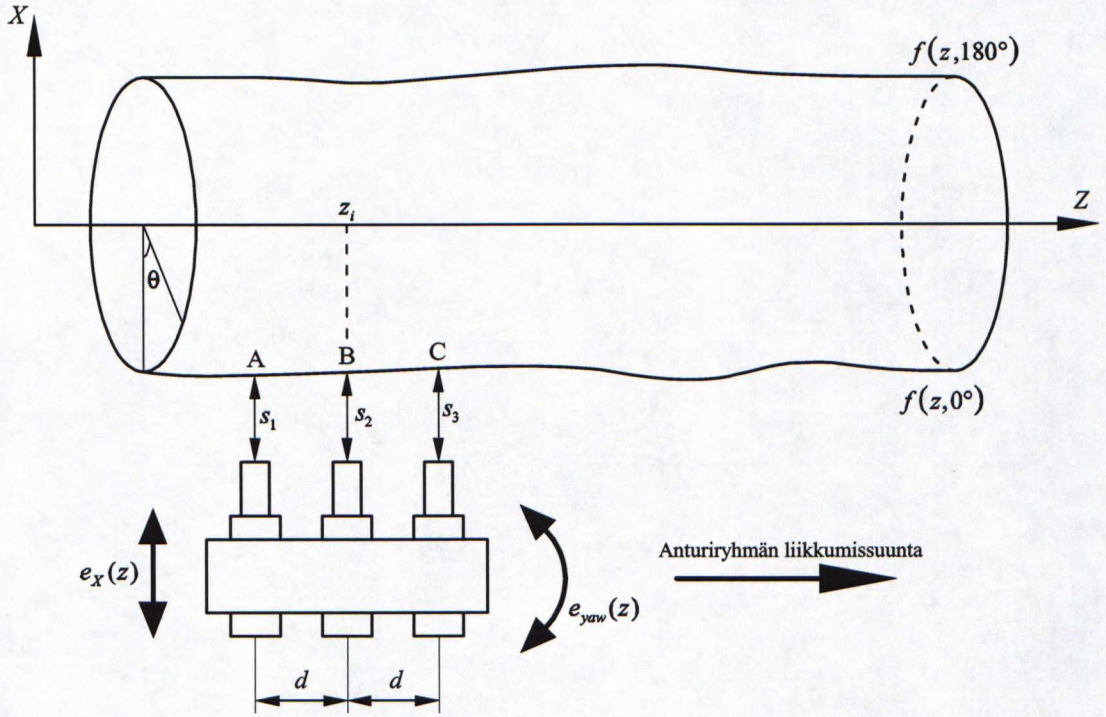


Kuva 23. Viiden anturin menetelmä sylinterimäisten kappaleiden mittaamiseen. [8]

Menetelmällä pystytään mittaamaan sylinterin keskiviivan sijainti, ympyrämuotoisuusvirhe ja halkaisija. Osa sylinterin taipuman harmonisista komponenteista suodattuu kuitenkin pois mittaustuloksesta.

2.3.5 Kuuden anturin menetelmä kelkan satunnaisvirheiden poistamiseksi

Gao et al ovat esittäneet menetelmän telan CD-profiilin mittaamiseksi kuudella anturilla [12]. Kuvassa 24 on esitetty periaate pinnanmuodon mittaamiseksi kolmella anturilla. $f(z, \theta)$ on telan pinnanmuotoa kuvaava funktio, joka on jaettu yhtä pitkiin osaväleihin d . Myös antureiden välinen etäisyys on d .



Kuva 24. Kolmen anturin menetelmä pinnan profiilin mittaamiseksi.

Funktion ensimmäinen derivaatta pisteessä B on sama kuin pinnan kaltevuus kyseisessä pisteessä. Sitä voidaan approksimoida pisteiden A ja C välisen suoran kulmakertoimella. Funktion $f(z)$ toinen derivaatta pisteessä B on likimäärin viereisten osavälien keskipisteiden erotus jaettuna d :llä:

$$f''(z_i)_i \approx \left(\frac{s_3(z_i) - s_2(z_i)}{d} - \frac{s_2(z_i) - s_1(z_i)}{d} \right) \frac{1}{d} = \frac{s_3(z_i) - 2s_2(z_i) + s_1(z_i)}{d^2} \quad (16)$$

Kun e_x on anturiryhmän x -suuntainen virheliike ja e_{yaw} anturiryhmän kiertäminen y -akselin ympäri mittauspisteessä z_i , kuvaa antureiden 1-3 antamia signaaleita yhtälöt

$$s_1(z_i) = f(z_i - d) + e_x(z_i) - de_{yaw}(z_i), \quad (17)$$

$$s_2(z_i) = f(z_i) + e_x(z_i) \text{ ja} \quad (18)$$

$$s_3(z_i) = f(z_i + d) + e_x(z_i) - de_{yaw}(z_i). \quad (19)$$

Näiden differentiaallinen ulostulo on

$$\begin{aligned}
m_s(z_i) &= \frac{s_3(z_i) - 2s_2(z_i) + s_1(z_i)}{d^2} \\
&= \left(\frac{(f(z_i + d) - f(z_i)) - (f(z_i) - f(z_i + d))}{d} \right) \frac{1}{d} \\
&\approx f''(z_i)_i,
\end{aligned} \tag{20}$$

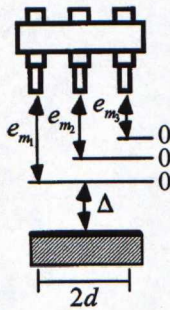
missä $i=1,2,\dots,N$ kun N on mittauspisteiden lukumäärä. Kun p on mittauspisteiden välinen etäisyys, saadaan N jakamalla mitattavan profiilin pituus p :llä.

Pinnan diskreettiä profiilia voidaan nyt approksimoida kaksoisintegroimalla differentiaalista anturisignaalia:

$$f(z_i)_i = \sum_{k=1}^i \left(\sum_{j=1}^k (m_s(z_j)p)p \right) \tag{21}$$

Todellisuudessa mittausdatan prosessoinnin yhteydessä tapahtuvat diskreetit derivointi- ja integrointioperaatiot aiheuttavat kaavan 21 mukaisesti laskettuun profiiliin laskentavirheen. Virhe on kuitenkin pieni, ja tässä yhteydessä se voidaan jättää huomiotta.

Huomattavasti merkittävämpi virhelähde on anturien kalibroinnissa tapahtuva nollausvirhe (kuva 25). Virhe syntyy, kun antureiden ulostulot kalibroidaan suoran referenssilevyn avulla. Koska kalibroinnissa käytettävä levy ei ole ideaalisen suora, syntyy kalibroinnissa nollausvirhe.



Kuva 25. Referenssitason avulla kalibroitaessa tapahtuva kalibroitivirhe.

Lisätään kaavoihin 17-19 kalibroinnin aiheuttamat virhetermit e_{s_n} . Anturisignaalit ovat nyt

$$s_1(z_i) = f(z_i - d) + e_x(z_i) - de_{yaw}(z_i) + e_{s_1}, \tag{22}$$

$$s_2(z_i) = f(z_i) + e_x(z_i) + e_{s_2} \text{ ja} \quad (23)$$

$$s_3(z_i) = f(z_i + d) + e_x(z_i) - de_{\text{yaw}}(z_i) + e_{s_3}. \quad (24)$$

Kaavasta 21 tulee siten

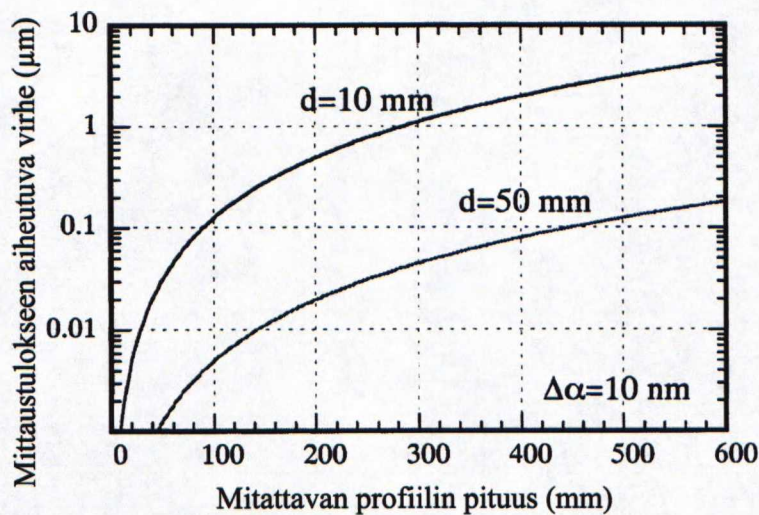
$$f(z_i)_i = \sum_{k=1}^i \left(\sum_{j=1}^k (m_s(z_j)s) \right) + \frac{\alpha}{2d^2} z_i^2, \quad (25)$$

jossa α on nolla-arvojen välinen ero, eli

$$\alpha = (e_{s_3} - e_{s_2}) + (e_{s_1} - e_{s_2}) = e_{s_3} - 2e_{s_2} + e_{s_1}. \quad (26)$$

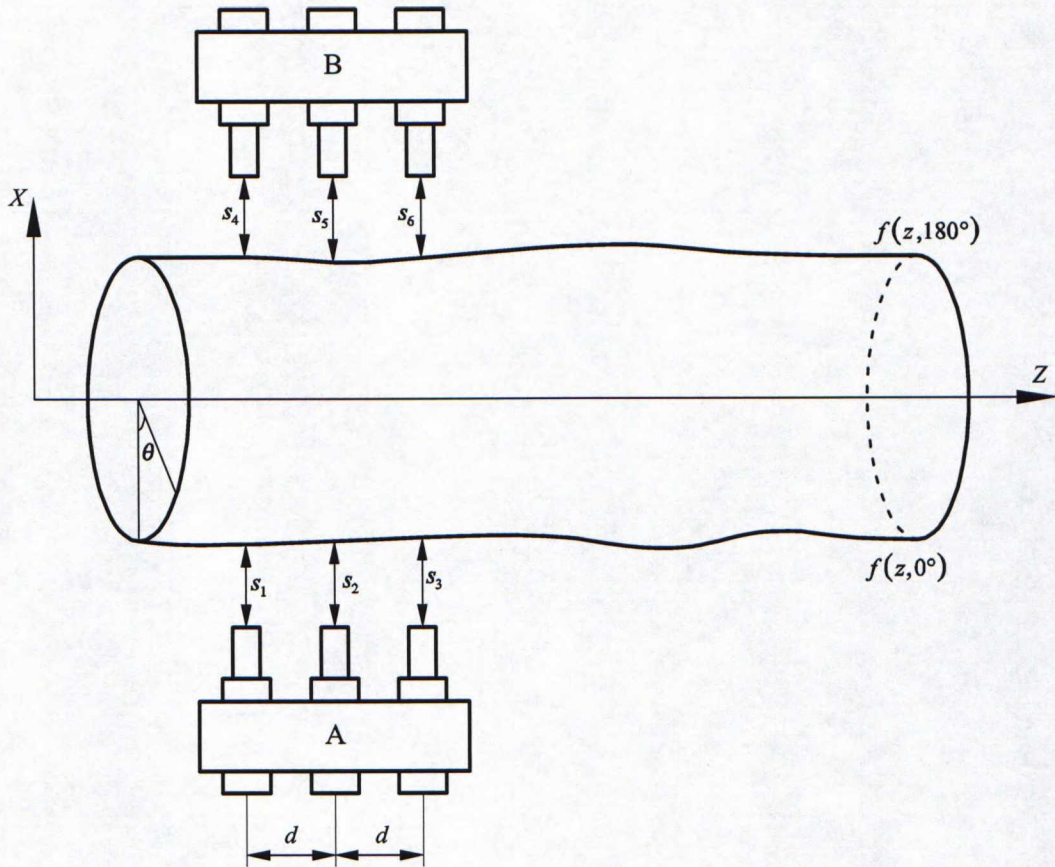
Nähdään, että kaavan 25 mukaisessa pinnan profiilin approksimoinnissa oleva kalibrointivirhetermi on verrannollinen mittauspituuden neliöön. Siten suhteellisen pienilläkin antureiden nolla-arvojen välisillä eroilla on suuri merkitys mittaustulokseen, jos mitattava kappale on pitkä.

Kuvasta 26 nähdään, miten kalibroinnissa käytettävässä referenssilevyssä oleva 10 nm:n suoruusvirhe vaikuttaa mittaustulokseen. Esimerkiksi 10 mm:n anturivälillä puolen metrin pituista kappaletta mitattaessa aiheutuu mitattuun profiiliin 3 μm :n suuruinen virhe.



Kuva 26. Kalibrointivirheen vaikutus mittaustulokseen eri anturiväleillä, kun referenssipinnan suoruusvirhe on 10 nm. [12]

Kolmen anturin menetelmässä suurimman mittausvirheen aiheuttava kalibrointivirhe voidaan poistaa asettamalla mitattavan telan vastakkaiselle puolelle toinen kolmen anturin yksikkö (kuva 27).



Kuva 27. Mittausjärjestely kelkan satunnaisvirheiden kompensoimiseksi.

Kun molemmat anturiyksiköt A ja B ovat samassa z -akselia pitkin liikkuvassa kelmassa, kopioituvat kelkan aiheuttamat virheet kummankin anturiryhmän mittauksiksi. Merkitään yksikön A antaman signaalin virhekomponenttia α :lla ja yksikön B virhekomponenttia β :lla. Yksikön B antureiden signaalit ovat s_4 , s_5 ja s_6 , joten virhekomponentti

$$\beta = (e_{s_6} - e_{s_5}) + (e_{s_4} - e_{s_5}) = e_{s_6} - 2e_{s_5} + e_{s_4}. \quad (27)$$

Tela mitataan kummallakin anturiryhmällä kaksi kertaa siten, että telaa käännetään 180° mittaukskertojen välillä. Jälkimmäisellä mittaukskerralla saadut antureiden signaalit ovat s_{1r} - s_{6r} . Näiden kahden mittaukskerran tulosten perusteella saadaan yhtälöryhmä, joista voidaan ratkaista virhetermit α ja β :

$$\beta - \alpha = \frac{1}{2N} \left(\sum_{i=1}^N \left[(s_6(z_i) - 2s_5(z_i) + s_4(z_i)) + (s_{6r}(z_i) - 2s_{5r}(z_i) + s_{4r}(z_i)) \right] - (s_3(z_i) - 2s_2(z_i) + s_1(z_i)) - (s_{3r}(z_i) - 2s_{2r}(z_i) + s_{1r}(z_i)) \right] \right) \quad (28)$$

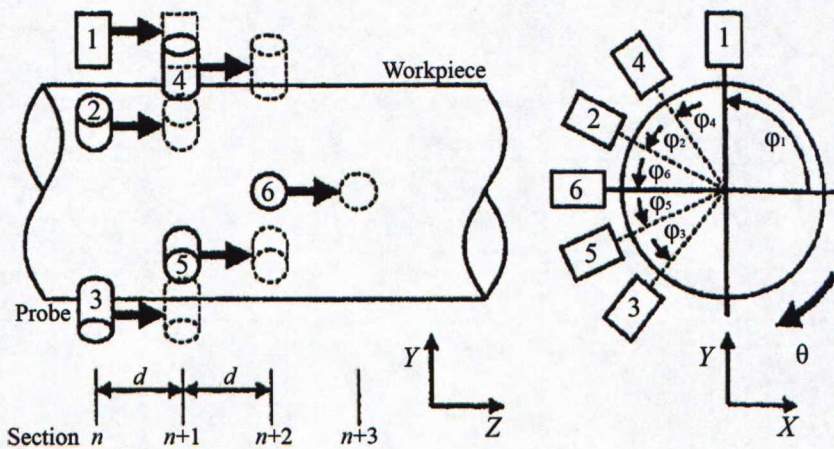
$$\beta + \alpha = \frac{1}{2(N - d/p)} \left(\sum_{i=1}^{N-d/p} \left[(s_3(z_i) - s_2(z_i)) + (s_2(z_i + d) - s_1(z_i + d)) + (s_{3r}(z_i) - s_{2r}(z_i)) - (s_{2r}(z_i + d) - s_{1r}(z_i + d)) + (s_6(z_i) - s_5(z_i)) - (s_5(z_i + d) - s_4(z_i + d)) + (s_{6r}(z_i) - s_{5r}(z_i)) - (s_{5r}(z_i + d) - s_{4r}(z_i + d)) \right] \right) \quad (29)$$

Kun ratkaistut termit α ja β sijoitetaan kaavaan 25, pystytään virhekomponenttien vaikutus poistamaan mittaustuloksesta.

Menetelmä vaatii siis yhteensä kuusi anturia ja kaksi mittauskertaa profiilia kohden. Referenssilevyjä ei tarvita anturien kalibroimiseksi. Mittakelkan x -akselin suuntaisesta translaatiosta ja yaw -kierrosta johtuvat virheet saadaan tällöin kompensoitua. Kelkkaa kuljettavan johteen y -akselin suuntaisesta käyryydestä aiheutuva virhe on kuitenkin mukana mittaustuloksessa. Virhe on systemaattinen, ja se voidaan poistaa mittaustuloksesta. [26]

2.3.6 Kuuden anturin menetelmä sylinterimäisyyden mittaamiseksi

Tässä menetelmässä [7] käytetään kuutta anturia, jotka on sijoitettu kolmeen poikkileikkaukseen sylinterin ympärille (kuva 28). Anturit on kiinnitetty yhteiseen sylinterin pituussuuntaiseen kelkkaan, jolla pyörivä kappale mitataan koko pituudeltaan.



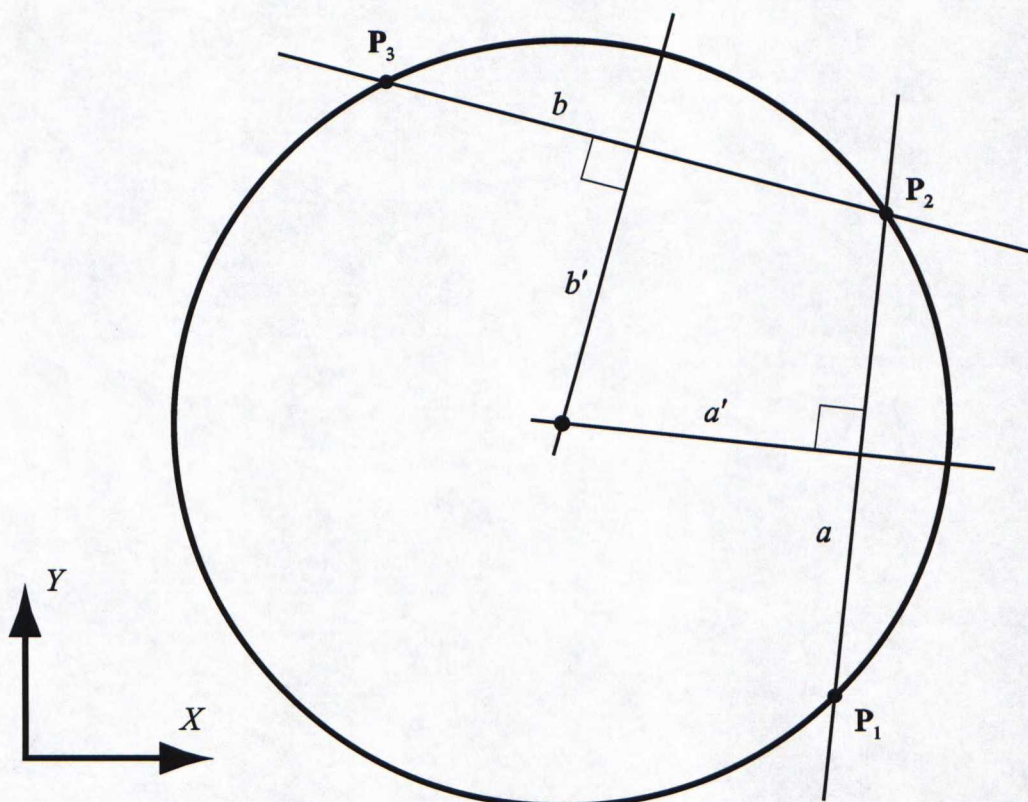
Kuva 28. Sylinterimäisyyden mittaus kuudella anturilla. [7]

Reunimmaisella kolmen anturin ryhmällä mitataan kunkin poikkileikkauksen ympyrämuotoisuus käyttäen perinteistä kolmen anturin menetelmää. Keskimääräinen halkaisija ja telan akselin suoruus kussakin mittauspisteessä mitataan käyttämällä kaikkia kuutta anturisignaalia. Kelkan virheet tai anturien nollakohdan kalibrointivirheet eivät vaikuta mittaustulokseen. Tällä menetelmällä pystytään siis saamaan sylinterimäisen kappaleen täydellinen muotoprofiili, kartiomaisuus ja taipuma mukaan lukien.

2.3.7 Ympyrän kaaren sovitukseen perustuva halkaisijanmittausmenetelmä

Geometriasta tiedetään, että ympyrän kaari voidaan määrittää kolmen pisteen perusteella. Mikäli heiton toteavat anturit on aseteltu mitattavan kappaleen ympärille xy -tasoon ja niiden sijainti ja suunta tiedetään, pystytään mittaustulosten perusteella laskemaan kappaleen halkaisija ja keskipisteen sijainti.

Kuvassa 29 olevat pisteet P_1 , P_2 ja P_3 ovat anturisignaalien perusteella saadut pisteet xy -tasossa.



Kuva 29. Kappaleen halkaisijan laskeminen, kun kolme pistettä sen kehällä tunnetaan.

Määritellään suorat a ja b siten, että ne kulkevat pisteiden P_1 ja P_2 sekä P_2 ja P_3 kautta vastaavasti. Tällöin suorien yhtälöt ovat

$$y_a = t_a(x - x_1) + y_1 \text{ ja} \quad (30)$$

$$y_b = t_b(x - x_2) + y_2, \quad (31)$$

joissa suorien kulmakertoimet ovat

$$t_a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \text{ ja} \quad (32)$$

$$t_b = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}. \quad (33)$$

Ympyrän keskipiste on kohdassa, jossa janojen $P_1 P_2$ ja $P_2 P_3$ keskinormaalit a' ja b' leikkaavat. Suoran normaalin kulmakerroin on suoran kulmakertoimen käänteisluvun vastaluku, joten suorien a' ja b' yhtälöt ovat:

$$y_{a'} = -\frac{1}{t_a} \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + \frac{y_1 + y_2}{2} \text{ ja} \quad (34)$$

$$y_{b'} = -\frac{1}{t_b} \left(x - \frac{x_2 + x_3}{2} \right) + \frac{y_2 + y_3}{2}, \quad (35)$$

Ympyrän keskipisteen sijainti saadaan ratkaisemalla yhtälöiden 34 ja 35 suorien leikkauspiste:

$$x = \frac{t_a t_b (y_1 - y_3) + t_b (x_1 + x_2) + t_a (x_2 - x_3)}{2(t_b - t_a)} \quad (36)$$

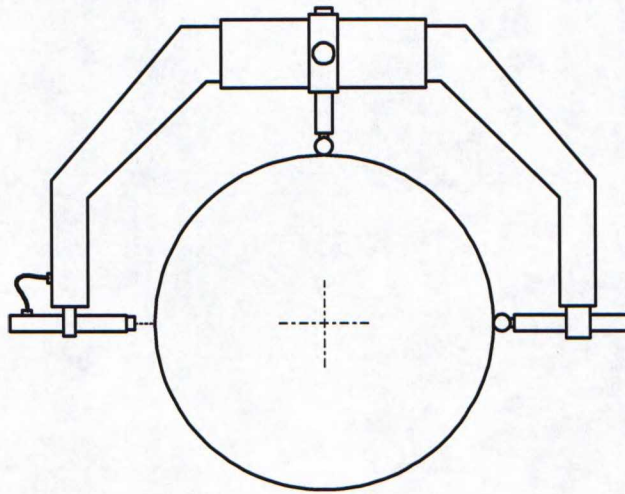
Ympyrän säde voidaan tämän jälkeen laskea minkä tahansa tunnetun kehän pisteen (P_1 , P_2 tai P_3) perusteella.

Kaava 36 on määritelty vain, kun $t_b - t_a \neq 0$, eli suorat a ja b eivät saa olla yhdensuuntaiset. Lisäksi pystysuorien viivojen tapauksessa kulmakerrointa (kaavat 32 ja 33) ei ole määritelty, joten pisteet tulee valita siten, ettei pystysuoria viivoja esiinny.

2.3.8 Telamittalaitteet

Teollisuudessa on käytössä erilaisia monipistemittalaitteita telojen muotovirheiden mittaamista varten. Kaksipistemenetelmällä voidaan mitata telan halkaisija, ympyrämuotoisuuden parilliset aaltomuodot ja heitto. Myös telan CD-profiili voidaan mitata edelliset rajoitukset huomioiden. Ympyrämuotoisuuden toteamiseen tarvitaan aina vähintään kolme anturia. Halkaisijan mittaamiseen käytetään usein kaksipistemittalaitteita, joissa antureiden välinen kulma on 180° . [26]

Uivassa kaksipistemittalaitteessa (kuva 30) on yksi anturi ja se on kahdesta pisteestä kosketuksissa telan kanssa. Mittauskulman valinta vaikuttaa ympyrämuotoisuuden mittaamisessa tapahtuvaan harmoniseen suodattumiseen.



Kuva 30. Uiva kaksipistemittalaite.

Jäykässä kaksipistemittalaitteessa on kaksi anturia, jotka on yleensä sijoitettu 180° asteen kulmaan toisiinsa nähden. Tällaisessa mittaustavassa absoluuttisen halkaisijan mittaaminen ei onnistu, mutta halkaisijaeroprofiili pystytään mittaamaan kun antureita pystytään liikuttamaan telan suuntaisesti. [26]

Hybrid-menetelmä [24] on Ozono-menetelmän (luku 2.3.3) neljännellä anturilla parannettu versio. Siinä käytettävät anturikulmat ovat 0° , 38° , 67° ja 180° , jolloin mitatut parilliset aaltomuodot ovat täsmällisiä eivätkä kolmen anturin perusteella laskettuja likiarvoja.

Hybrid-menetelmä voi olla uiva, jolloin mittakaari on kahdesta pisteestä kosketuksissa telan kanssa, ja siinä on kaksi heiton toteavaa anturia. Mittakaari siis liikkuu telan mukana sen kieppuessa. Uivalla menetelmällä ei pystytä näkemään telan pyörimiskeskiön liikettä. [15]

Jäykällä Hybrid-menetelmällä pystytään näkemään telan pyörimiskeskusteen liike ja ympyrämuotoisuusprofiili. Mikäli mittakaarta voidaan liikuttaa tarkalla johteella telan suuntaisesti, saadaan mitattua myös telan halkaisijaprofiili. [35]

2.4 Paperi

Tässä luvussa kerrotaan lyhyesti paperin täyte- ja lisäaineiden käytön syistä ja seurauksista, paperin mitattavista ominaisuuksista ja telojen vaikutuksesta niihin. Lopussa on vielä käyty läpi eri paperilajien kirjo ja telojen laadun merkitys eri lajeille.

2.4.1 Täyte- ja lisäaineet

Suurin osa paperilaaduista sisältää varsinaisten kuitujen lisäksi täyteaineita ja lisäaineita.

Lisäaineet voidaan jakaa kahteen kategoriaan käytön syyn mukaan: paperin laatuun vaikuttaviin eli funktionaalisiin lisäaineisiin ja valmistusprosessin toimivuutta parantaviin lisäaineisiin. Suurimmalla osalla lisäaineista on kuitenkin vaikutusta molempiin asioihin.

Funktionaalisilla lisäaineilla voidaan vaikuttaa muun muassa paperin lujuuteen (liimat), veden- tai rasvanhylkivyyteen, väriin, syttyvyyteen, homehtumiseen, elintarvikkeiden säilyvyyteen, tuoksuun, makuun, imukykyyn, kitkaan ja jälkiliimautumiseen. Funktionaalisia lisäaineita voidaan lisätä joko massaan tai liimapuristimella. [29]

Täyteaineet ovat luonnon mineraaleista valmistettuja valkoisia jauhemaisia aineita. Niiden tarkoitus on täyttää kuitujen välisiä huokosia paperissa, jolloin ne lisäävät paperin tiheyttä sekä parantavat opasiteettia, vaaleutta, kiiltoa, sileyttä ja absorptiota. Täyteaineet vähentävät massan flokkiintumista siten parantaen formaatiota. Myös paperin kuivattaminen helpottuu, koska täyteaineet eivät pidätä vettä samalla tavalla

kuin kuidut. Suurina määrinä käytettävät täyteaineet ovat kuitua huomattavasti halvempia, joten niiden käytön etuna on myös tuotantokustannusten aleneminen. Päällystämättömissä paperilaaduissa täyteaineita on yleensä alle kolmasosa. Usein täyteaineita on myös päällysteissä, jolloin päällystetyssä paperissa saattaa olla täyteaineita kokonaisuudessaan 45%. [37]

Täyteaineiden käytöllä on myös huonoja puolia. Paperin ominaisuuksista lujuus, märkälujuus, jäykkyys ja retentio heikkenevät. Täyteaineet saattavat myös aiheuttaa pölyämistä painatuksessa. Täyteainepartikkelien kovuus ja särmikkyys aiheuttavat telojen kulumista. [29]

2.4.2 Paperin ominaisuudet

Paperilla ja kartongilla on lukuisia mitattavia ominaisuuksia. Tässä käydään läpi oleelliset ominaisuudet sekä niiden osalta telojen vaikutus radan profiiliin.

Neliömassa

Neliömassa tarkoittaa paperin massaa pinta-alayksikköä kohti, joten sen yksikkö on g/m^2 . Neliömassalla on vaikutusta käytännössä kaikkiin lopputuotteen ominaisuuksiin. Paperikoneessa rainan neliömassaprofiili mitataan β -säteilyn absorption perusteella.

Neliömassan säätämisen kannalta oleellisin osa on perälaatikko, koska rainanmuodostuksen jälkeen massan jakautumiseen ei juuri voida vaikuttaa. Perälaatikon jälkeen neliömassa toki muuttuu, mutta muutokset ovat luonteeltaan systemaattisia. Teloilla ei ole merkittävää vaikutusta pohjapaperin neliömassaan, mutta päällystysaseman telojen laatu on oleellista päällysteen neliömassaprofiilin kannalta. [33, 36]

Kosteus

Kosteudella tarkoitetaan veden suhteellista osuutta paperin massasta. Kosteuden mittausta tehdään infrapunasäteilyn absorption perusteella. Paperinvalmistusprosessi on luonteeltaan vedenpoistoa, joten kosteuden jakautumiseen rainassa vaikuttavat käytännössä kaikki prosessin vaiheet. Tämän takia kosteusprofiilin säätö on monimutkainen ongelma. Säädössä käytetään profiilisäädettäviä höyrytyslaatikoita, kostutussuihkuja tai infrapunakuivaimia. Märkäpuristimen nippipaineen profiili-

säädöllä pystytään myös vaikuttamaan kosteusprofiiliin. Puristintelojen laadulla on siis vaikutusta kosteusprofiiliin, vaikka telojen ja rainan välissä oleva huopa tasaa telojen muotovirheitä. [33, 37]

Paksuus, bulkki ja huokoisuus

Paperiradan paksuusprofiilin mittaamiseen paperikoneessa on useita eri menetelmiä. Paperin tiheys taas lasketaan paksuuden ja neliömassan perusteella. Tiheyden yksikkö on kg/m^3 . Bulkki on tiheyden käänteisluku, ja sen yksikkönä käytetään yleisesti cm^3/g . Paperin tiheys tarkoittaa pitkälti paperin huokoisuutta, eli kuitujen ja täyteaineiden väliin jäävän ilman määrää. Myös ilman- tai nesteenläpäisykyky eli permeaatio sekä nesteen imukyky eli penetraatio liittyvät läheisesti paperin huokoisuusominaisuuksiin.

Paperin tiheyttä kasvattavat täyte- ja päällystysaineiden lisääminen, suuri märkäpuristus ja voimakas kalanterointi. Paksuusprofiilin säätö tapahtuu yleensä kalanterissa, jossa nippipaineprofiilia säätämällä pystytään vaikuttamaan paksuusprofiiliin. Paperin paksuusprofiilin muuttumiseen kalanteroinnissa vaikuttavat oleellisesti paperin neliömassa- ja kosteusprofiilit. Kalanteritelojen laadulla on suuri merkitys paperiradan paksuus- ja tiheysprofiiliin. [4, 37]

Kiilto ja pintarakenne

Pintarakenteella tarkoitetaan lähinnä paperin pinnan karheutta. Mikrotason karheus tarkoittaa käytännössä paperin kiiltoa. Pintarakenteen käsitteeseen sisältyy kuitenkin muitakin ominaisuuksia, joilla on merkitystä painettavuuden, eli lähinnä painomusteen leviämisen ja painojäljen kannalta.

Kiilto on helposti mitattavissa oleva suure, joka tarkoittaa paperin kykyä heijastaa takaisin siihen vinosti suunnattu valonsäde. Paperin korkea sileyys mikrotasolla saa aikaan korkean kiillon. Sileyteen taas vaikuttaa kuitujen ja erityisesti päällysteen hiukkaskoko. Jälkikäsitteypään teloilla, kuten kalanteriteloilla, on suuri merkitys paperin pintarakenteen kannalta. [16, 37]

Formaatio ja orientaatio

Formaatio tarkoittaa neliömassan paikallista vaihtelua. Se johtuu kuitujen muodostamien kertymien eli flokkien aiheuttamasta epätasaisuudesta. Paperin

formaatiota voi arvioita tarkastelemalla sitä valoa vasten. Paperikoneessa formaation mittaamiseen käytetään β -säteilyn absorptioon perustuvien mittausten lisäksi valonläpäisyyden perustuvia mittauksia. Formaatio ilmaistaan yleensä neliömassan hajontana, tai neliömassan keskiarvosta riippumattomana hajonnan neliöjuurena.

Orientaatio tarkoittaa kone- ja poikkisuuntaisesti asettuneiden kuitujen määrän suhdetta. Orientaation mittaamiseen ja ilmaisemiseen käytetään yleensä kone- ja poikkisuuntaisen vetolujuuden suhdetta. Koneella valmistetussa paperissa kuituja on aina enemmän koneensuuntaisesti kuin poikkisuuntaisesti, jolloin orientaatio on siis suuri. Orientaation kannalta tärkeimmät säädöt tapahtuvat perälaatikossa ja viirassa, erityisesti perälaatikon suihkun ja viiran nopeuseroa säätämällä. Puristin- ja kuivatusosilla voidaan myös vaikuttaa orientaatioon lähinnä rainaa venyttämällä ja kuivumiskutistumaa estämällä. [33, 37]

Lujuusominaisuudet

Paperin lujuutta ilmaisevia suureita on runsaasti, kuten esimerkiksi puhkaisulujuus, pintalujuus, märkälujuus ja taittoluku. Orientaation takia lujuusominaisuudet ovat erilaiset koneensuunnassa kuin poikkisuunnassa mitattaessa.

Vetolujuus tarkoittaa paperiliuskan repeämiseen tarvittavaa voimaa sitä venytettäessä. Vetolujuuden yksikkö on yleensä kN/m, koska se on riippuvainen venytettävän arkin leveydestä. Repäisylujuus ilmoittaa repeämisen jatkamiseen vaadittavan voiman. Repäisylujuus on huomattavasti pienempi kuin vetolujuus, ja sen yksikkönä on yleisesti mN.

Reologisilta ominaisuuksiltaan paperi on melko epäideaalinen. Se on jonkin verran plastinen aine, eli paperiarkki ei palaudu täysin ennalleen venytyksen jälkeen. Paperin muodonmuutokseen tarvittava jännitys on riippuvainen muodonmuutoksen nopeudesta, eli paperi on viskoottinen aine. Paperin kimmokerroin riippuu paljon koeoloista, kuten kosteudesta. [36, 37]

Vaaleus ja opasiteetti

Vaaleus tarkoittaa paperin kykyä heijastaa takaisin siihen kohdistunutta valoa. Vaaleuden mittaukseen laboratorio-olosuhteissa on lukuisia standardoituja menetelmiä. Yleisimmin vaaleutta kuvataan ominaisheijastusluvulla R_{∞} , joka kuvaa

äärettömän paksun paperipinon pintaan kohdistetun energian suhdetta pinnasta heijastuvaan energiaan.

Opasiteetti tarkoittaa paperin läpinäkyvyyttä. Opasiteetti mitataan vastaavalla tavalla kuin vaaleus, mutta siten, että paperipinon tilalla on yksi paperiarkki, jonka alla on täysin heijastamaton pinta. Siten saadaan heijastusluku R_0 . Opasiteetti ilmoitetaan heijastuslukujen R_0 ja R_∞ prosentuaalisena suhteena.

Opasiteetti ja vaaleus ovat monilta osin kytköksissä toisiinsa, eikä toista juurikaan voida säätää vaikuttamatta toiseen. Oleelliset tekijät paperin opasiteetin ja vaaleuden kannalta ovat muunmuassa täyte- ja lisäaineiden määrä ja laatu sekä massan valkaisu ja muut ominaisuudet. Kalanteroinnilla on heikentävä vaikutus sekä opasiteettiin että vaaleuteen, ja kalanterin teloilla on merkitystä näiden ominaisuuksien profiilisäädössä. [37]

Toispuolisuus

Toispuolisuudella tarkoitetaan minkä tahansa paperin rakennetta kuvaavan ominaisuuden eroa paperin eri puolilla. Yleisesti ottaen paperin rakenne paksuussuunnassa on erityisesti materiaalijakauman osalta varsin epätasainen. Toispuolisuuteen vaikuttaa vedenpoiston suunta valmistusprosessin eri vaiheissa sekä käytännössä kaikki rainan kanssa kosketuksissa olevat pinnat koko paperikoneessa. [37]

2.4.3 Paperi- ja kartonkilajit

Paperilajien luokitteluun ei ole olemassa yleisesti käytössä olevaa standardoitua järjestelmää. Paperilajit voidaan ryhmitellä esimerkiksi raaka-ainekoostumuksen, neliömassan tai valmistusmenetelmän mukaan. Valmistusmenetelmien nopean kehittymisen myötä yhä yleisempi tapa luokitella eri paperilajit on loppukäyttökohteen mukaan.

Maailmassa tuotettavia papereita ja kartonkeja on satoja eri tyyppisiä. Euroopalaisilla paperintuottajilla on tapana jakaa tuotteet neljään pääryhmään: paino- ja kirjoituspaperit, kartongit ja pahvit, pehmopaperit sekä erikoispaperit. [34]

Tässä luvussa kerrotaan valmistusprosessissa käytettävien telojen tarkkuuden kannalta oleellisista paperilajeista.

Paino- ja kirjoituspaperit

Paino- ja kirjoituspapereita käytetään sanoma- ja aikakauslehtiin, luetteloihin, kirjoihin, kopiointiin, tulostukseen, lomakkeisiin yms. Niiden osuus maailman paperimarkkinoista on noin 30 %. Paino- ja kirjoituspaperit voidaan jakaa edelleen kahteen ryhmään käytettävän pääraaka-aineen perusteella: Mekaanisesta massasta valmistettaviin eli puupitoisiin, ja selluloosasta valmistettaviin eli puuvapaisiin paperilajeihin. Puuvapaita paperilajeja kutsutaan yleisesti hienopapereiksi. Monissa paperilajeissa on raaka-aineena sekä mekaanista massaa että sellua, mutta jompikumpi on yleensä vallitsevana. Keräyspaperista valmistettava uusiokuitumassa on kolmas tärkeä raaka-aine.

Puupitoiset paperilajit

Mekaanisesta massasta valmistettavat paperilajit ovat edullisempia kuin kemiallisesta massasta valmistettavat. Niiden muita etuja ovat hyvä opasiteetti myös pienillä neliöpainoilla sekä hyvä painettavuus. Huonona puolena on paperin huono arkistoitavuus, jonka takia mekaanisesta massasta valmistettuja paperilajeja käytetään lähinnä tuotteissa, joiden elinkaari on lyhyt. Pinnoittamalla paperin kestoikää voidaan pidentää.

Sanomalehtipaperi on tuotteena pitkälle standardoitu suuren volyymin bulkkituote, minkä takia sen valmistus on kannattavinta nykyaikaisimmilla leveillä ja nopeilla paperikoneilla. Valtaosa sanomalehtipaperista käytetään sanomalehtien painamiseen ja pieni osa menee puhelinluetteloihin tai kirjoihin. Sanomalehdet painetaan nopeilla rotaatiopainokoneilla tiukalla aikataululla, minkä takia hyvä painettavuus on oleellista. Sanomalehtipaperia ei pinnoiteta, mutta se yleensä kalanteroidaan. Sanomalehtipaperi sisältää täyteaineita vain vähän, jottei se pölyäisi eikä sen jäykkyys kärsisi. Kierrätyskuitua käytetään usein täyteaineena.

Superkalanteroitu paperi (*supercalendered*, SC) on sanomalehtipaperia vaaleampaa, tiiviimpää ja kiiltävämpää, ja monesti neliöpainoltaan raskaampaa. Se on päällystämätön paperilaji, ja korkeakiiltainen pinta saavutetaan superkalanteroinnilla. SC-paperia käytetään lähinnä aikakauslehtipaperina, mutta myös luetteloissa ja kuvastoissa. Superkalanteroitu paperi on teknisessä mielessä yksi vaikeimmin valmistettavista painopaperilajeista. Tähän on superkalanterin

teknisten vaatimusten lisäksi syynä SC-paperin suuret tuotantovolyymit, jonka takia sitä valmistavien koneiden on oltava nopeita ja leveitä.

Päällystetyt puupitoiset paperilajit muodostavat laajan painopapereiden ryhmän. Neliöpaino vaihtelee ULWC:n (*ultra light weight coated*) 35 g/m²:sta HWC:n (*high weight coated*) jopa 170 g/m² asti. SC-paperiin verrattuna niillä on parempi painojälki, vaaleus ja kiilto. Käyttökohteita ovat aikakauslehdet ja kuvastot sekä niiden kannet. Muita päällystettyjä puupitoisia paperilajeja ovat konepäällystetty MFC-paperi (*machine finished coated*) ja melko uutena tuotteena kalvopäällystetty offset-paperi (FCO, *film coated offset*).

Puuvapaat paperilajit

Sellusta valmistettavat paperilajit eli hienopaperit ovat puupitoisia lajeja korkealaatuisempia ja kalliimpia. Niillä on hyvä arkistoitavuus. Pinnoittamattomissa hienopapereissa (WFU, *wood-free uncoated*) käytetään usein valkaistua sellua sekä täyteaineena kalsiumkarbonaattia, joiden ansiosta paperi on erittäin vaalea. Tämän ja hyvän opasiteetin takia WFU-paperien yleisimmät käyttökohteet ovat toimistojen tulostus- ja kopiopaperit, lomakkeet yms. WFU-paperilajeja valmistetaan laajalla neliömassaskaalalla aina ”raamattupaperin” 25 g/m²:sta jopa 300 g/m² asti. Yleisin on toimistoissa käytettävä 80 g/m².

Päällystettyjä hienopapereita (WFC, *wood-free coated*) käytetään varsin moninaisiin vaativiin tulostus- ja painotarkoituksiin. Ne ovat yhdestä kolmeen kertaan päällystettyjä ja yleensä myös kalanteroituja. Yksi korkealaatuisimmista painopaperilajeista on taidepainopaperi, jonka päällysteen neliöpaino voi olla jopa 40 g/m² per puoli. Uusi suuntaus on myös taidepainopaperien valmistaminen suurilla ja tehokkailla paperikoneilla.

Kartongit

Kartonkien ja papereiden välinen raja on häilyvä, mutta yleensä kartongit ovat neliömassaltaan papereita raskaampia ja monikerroksisia. Kartonkilajit voidaan luokitella rasiakartonkeihin, laatikkopahveihin (eli aaltopahvi) ja erikoiskartonkeihin.

Rasiakartonkeja käytetään lähinnä erilaisissa pakkauksissa, jonka takia niiltä edellytetään mitä moninaisimpia ominaisuuksia, kuten puhtaus, hajuttomuus ja

tulostettavuus. Lisäksi rasioiden valmistus taittelemalla asettaa erilaisia vaatimuksia mekaanisten ominaisuuksien suhteen.

Kartonkikoneiden nopeus- ja leveyskehityksessä ei ole nähtävissä samanlaista trendiä kuin paino- ja kirjoituspaperikoneilla. Uusienkin koneiden mitoitusnopeus on usein alle 1000 m/min. Leveyden kehitystä rajoittaa monesti kohdemarkkina-alueella käytettävien jälkikäsittelykoneiden leveys.

Pehmopaperi

Pehmopapereihin kuuluvat talous- ja toilettipaperit, kasvopyyhkeet, lautasliinat sekä muut paperit joilta edellytetään hyvää imukykyä tai pehmeyttä. Tyypillisessä pehmopaperikoneessa on lyhyt viiraosa, jonka jälkeen rainan kuivatus tapahtuu usein pelkällä jenkkisylinterillä. Kuivauksen jälkeen paperi krepataan imukyvyn ja pehmeiden kasvattamiseksi.

Kaiken kaikkiaan pehmopaperin valmistus on teknisesti yksinkertaista, eikä riittävän korkealaatuisen lopputuotteen valmistaminen ole teknisesti haastavaa. Uudet pehmopaperikoneet ovat yleensä varsin nopeita, mutta tyypillinen leveys on vain 2-3 metriä.

Erikoispaperit

Erikoispapereihin luetaan suuri joukko pienen volyymin paperilajeja, jotka eivät kuulu mihinkään edellä mainituista kategorioista. Erikoispapereille tyypillistä on, että lopputuotteen kustannuksesta siinä käytettävän paperin osuus on pieni, kun taas tuotteen laadun kannalta paperin laadulla on suuri merkitys.

Esimerkkeinä erikoispapereista mainittakoon sähkökaapeleiden ja -komponenttien eristepaperit, suodatinpaperit, tarrojen taustana käytettävät irrokepaperit, hiomapapereiden taustapaperit, tapetit, savukepaperit ym.

3. TUTKIMUSMENETELMÄT

3.1 Mittausmenetelmän vaatimukset

Mittausmenetelmän perusvaatimuksena on, että menetelmällä tulee pystyä mittaamaan telan keskimääräiset halkaisijaerot telan koko matkalta. Tyypillisen telan halkaisijaeroprofiili ei sisällä kovin korkeataajuisia komponentteja, kuten olakkeita, joten z-suunnassa mittaukselta ei edellytetä suurta resoluutiota. Mitatun halkaisijaeroprofiilin tulee olla yhden mikrometrin sisällä todellisesta.

Menetelmän tulee soveltua myös käynninaikaiseen mittaamiseen. Käytännössä mittaustarpeet kohdistuvat lähinnä jälkikäsittelyprosessien, kuten kalanterin teloihin, jolloin telan pinnasta on näkyvissä vain osa. Vaatimuksena on, että menetelmä ei saa tarvita yli 90 asteen näkyvyyttä telasta.

Mittaukseen on käytettävissä telansuuntaisesti asennettu päistään tuettu palkki. Palkissa on lineaarijohde, jonka kelkkaan anturit voidaan kiinnittää. Taipumisen ja kelkan virheliikkeiden aiheuttamat mittausvirheet tulee pystyä erottamaan mittaustuloksesta. Mittakehä, johon anturit kiinnitetään, voidaan olettaa mekaanisesti riittävän tarkaksi.

Taloudellisten seikkojen takia antureiden lukumäärä tulisi olla mahdollisimman pieni.

Koska telojen kuluminen tapahtuu pitkällä aikajänteellä, ei mittaustapahtumaan käytettävissä olevaa aikaa ole rajoitettu.

3.2 Mittausmenetelmän valinta

Kirjallisuusselvityksessä esitetyistä mittausmenetelmistä valittiin annettujen vaatimusten perusteella sopivin menetelmä simulaatiota varten. Eri mittausmenetelmien oleelliset ominaisuudet on koottu taulukkoon 1.

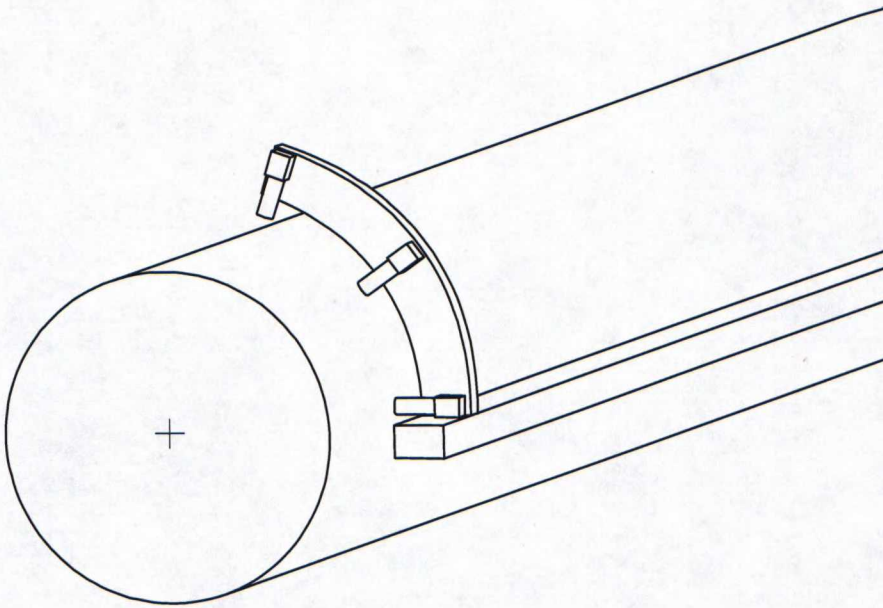
Taulukko 1. Yhteenveto vaihtoehtoisista mittausmenetelmistä.

	Mitattava muotoviiva	Antureiden lukumäärä	Vaadittu näkyvyys
Ozono (luku 2.3.3)	ympyrä	3	< 90°
Ympyrän kaaren sovitus (luku 2.3.7)	ympyrä	3	< 90°
Endo 2004 (luku 2.3.4)	spiraali	5	220°
Gao 2002 (luku 2.3.5)	sivuviiva	6	180°
Endo 2003 (luku 2.3.6)	ympyrä ja sivuviiva	6	270°

Telan rajoitetun näkyvyyden vuoksi esitetyistä menetelmistä Ozono-menetelmä tai ympyrän kaaren sovitukseen perustuva menetelmä ovat ainoat käytäntöön sopivat menetelmät. Näiden kahden menetelmän erona on pelkästään mittausdatan matemaattinen käsittely. Niissä voidaan käyttää samaa mekaniikkaa sekä anturien asemointia ja kulmavalintoja.

Molempien menetelmien etuna siis on, että samaa mekaanista rakennetta voidaan käyttää halkaisijan mittaamisen lisäksi myös ympyrämuotoisuuden mittaamiseen Ozono-menetelmällä. Koska tässä sovelluksessa on tarkoitus mitata ainoastaan keskimääräinen halkaisija, ei matemaattisesti hieman monimutkaisemman Ozono-menetelmän käytöstä ole erityistä etua.

Simuloinnissa käytetään siten luvussa 2.3.7 esitettyä ympyrän kaaren sovitukseen perustuvaa menetelmää. Kuvassa 31 on esitetty käytännön mittausjärjestely.

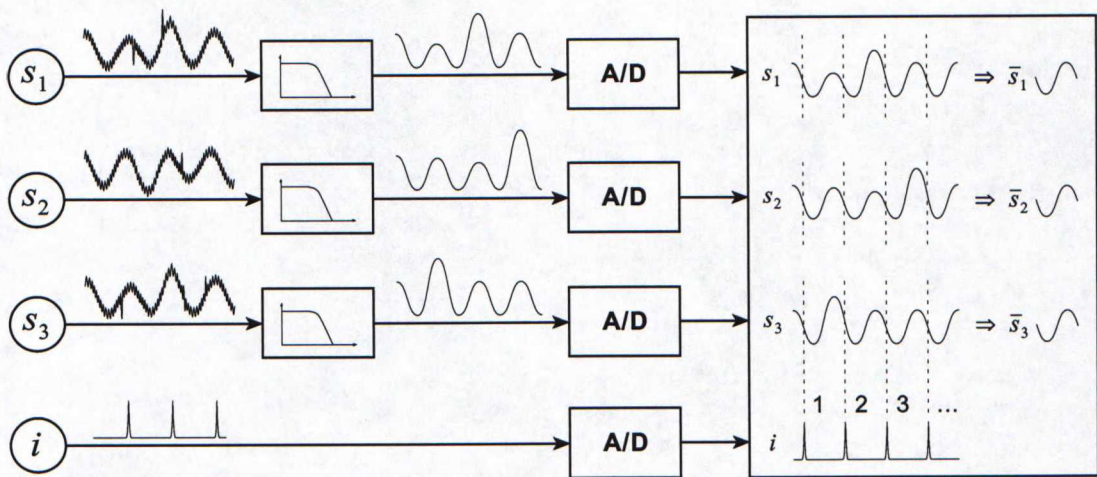


Kuva 31. Halkaisijan mittaamisessa käytettävä mittausjärjestely. Mittakehällä on kolme etäisyysanturia telan säteen suuntaisesti. Mittakehä on kiinnitetty päistään tuettuun lineaarijohteeseen.

3.3 Mittauksen signaalinkäsittely ja parametrit

Mittaus tehdään telan pyöriessä, jolloin antureilta saatava mittausdata voidaan keskiarvoistaa kierroskohtaisesti. Tällöin mittausjärjestelmään tarvitaan tieto telan pyörähdyskulmasta, tai vakiopyörimisnopeudella yksi liipaisutieto kierrosta kohti. Näin saadaan useamman kierroksen keskiarvona mitatut anturisignaalit. Tässä menetelmässä näistä saaduista signaaleista voidaan vielä ottaa keskiarvo koko kierrokselta, koska menetelmällä lasketaan anturisignaaleista ainoastaan keskimääräinen halkaisija. Kierroskohtainen keskiarvoistaminen ei siis ole välttämätöntä, vaan kunkin anturin keskimääräinen näyttämä kussakin mitattavassa z-akselin pisteessä riittää.

Kuvassa 32 on menetelmässä käytettävää signaalinkäsittelyä havainnollistava vuokaavio. Anturisignaaleilta saatava data on analogista, ja ennen näytteenottoa se alipäästösuodatetaan epäkiinnostavien taajuuksien poistamiseksi sekä laskostumisen välttämiseksi [3]. Näytteenoton jälkeen antureilta saadut signaalit pätkitään liipaisu- tiedon perusteella, ja niistä lasketaan usean kierroksen keskiarvot.

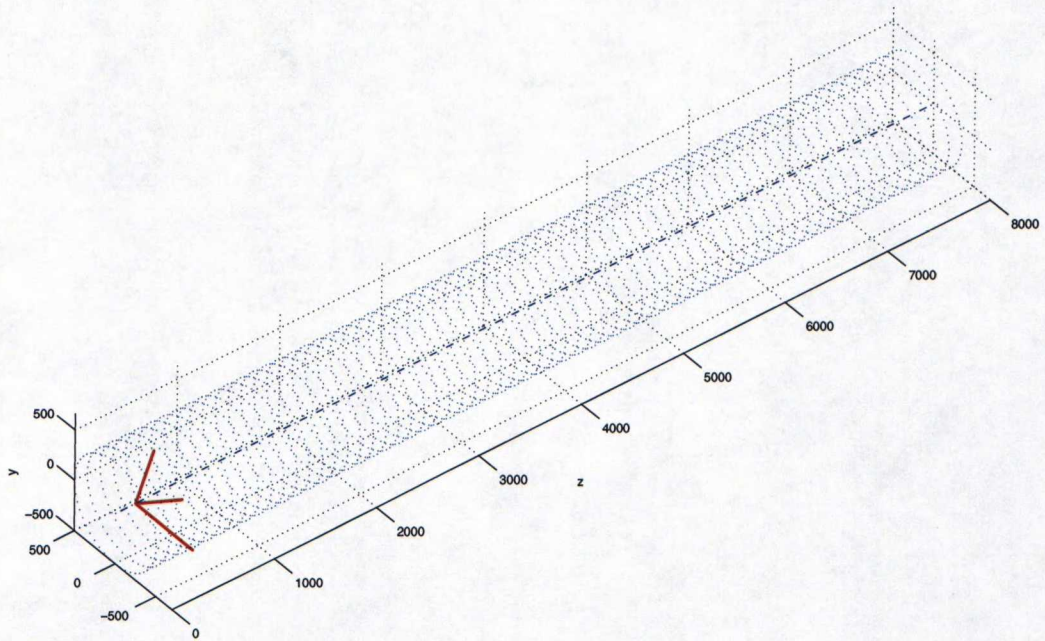


Kuva 32. Mittaussignaalien käsittely.

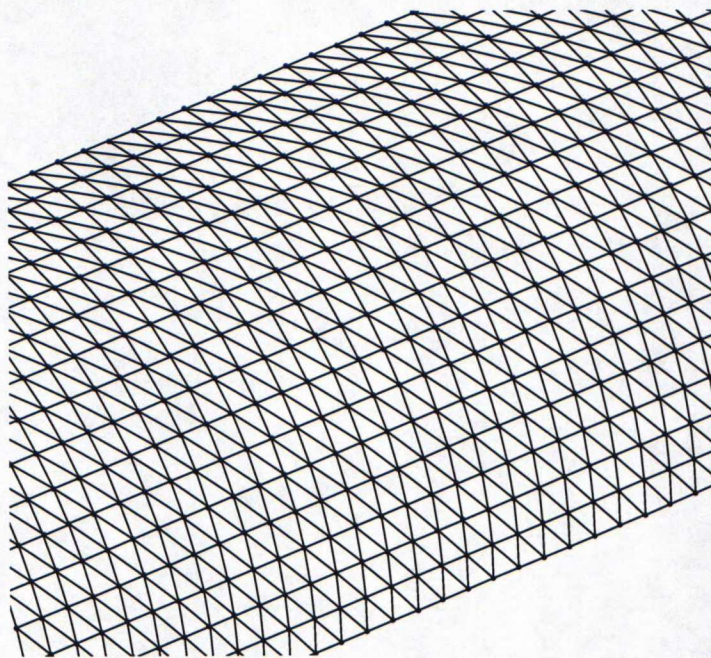
Koska mittaus on tarkoitus tehdä koneen käydessä, on huomiota kiinnitettävä värähtelyn vaikutukseen mittauksessa. Värähtelylle ei tässä työssä kehitetä aktiivista kompensointia, vaan värähtelyn vaikutus pyritään minimoimaan mittausproseduurin ja tiedonkeruuparametrien avulla.

3.4 Simulaatiomalli

Mittausmenetelmän simulointi toteutettiin Matlab-ohjelmistolla rakennetulla simulaatiomallilla. Malli koostuu telasta ja antureista. Antureilla on sijainti ja mittaussuunta, ja ne mittaavat anturin etäisyyden telan pinnasta anturin mittaussuunnassa. Telan malli on kuvassa 33 näkyvä avaruuden pistejoukko. Pisteverkko määrittelee kolmikulmaisen tessellaation, joka on telan pinta (kuva 34). Pisteet ovat siis kolmionmuotoisten tasojen verteksejä. Simuloinnissa käytetyssä telassa on 8192 poikkileikkausta, joista kukin koostuu 512 säteittäisestä pisteestä.



Kuva 33. Mallinnettu tela (sininen pisteverkko) ja anturit (punaisella).

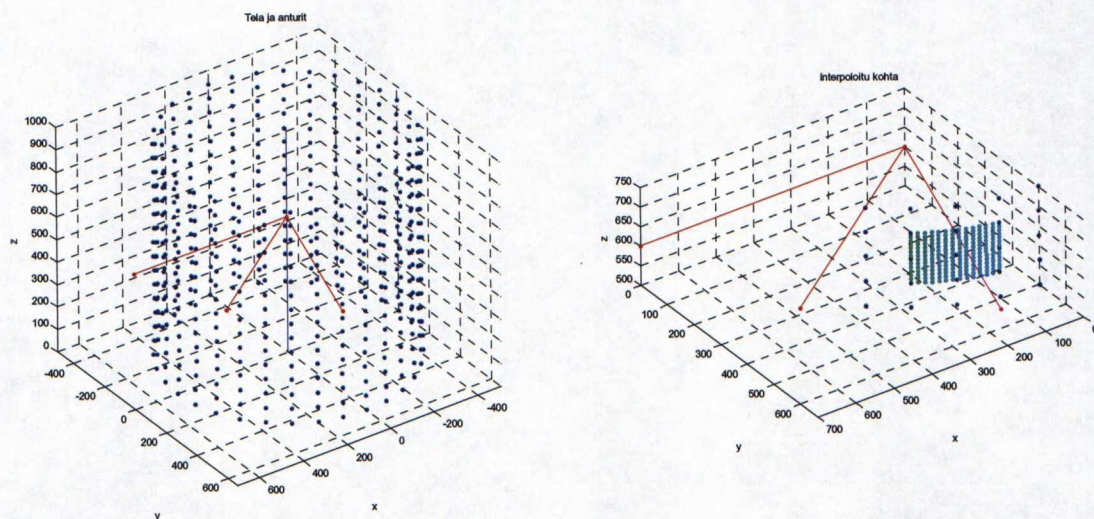


Kuva 34. Osa telan pinnasta, jossa näkyy pinnan jako tasomaisiin kolmionmuotoisiin alueisiin.

Jotta telan ympyrämäisyysprofiili ei olisi monikulmio, tulee pisteverkon säteittäisresoluution olla riittävä. Tietokoneiden rajallisen muistikapasiteetin takia telan resoluutiota ei ole järkevää kasvattaa loputtomasti, varsinkaan kun telan pinnanmuodot koostuvat hyvin matalataajuisista komponenteista. Tämän takia mittauksen aikana telan pintaan interpoloidaan lisää pisteitä siten, että mitattavassa

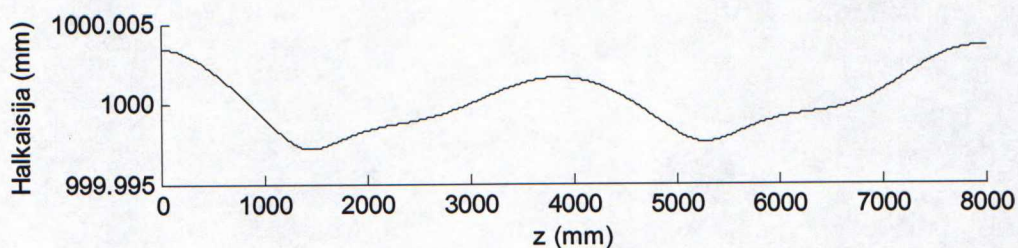
kohdassa kukin pisteiden väli täytetään tarkemmalla pisteverkolla. Kukin poikkileikkaus koostuu siten riittävästä määrästä pisteistä ilman, että pisteverkon sisältävän matriisin koko kasvaa liikaa.

Interpolointi (kuva 35) suoritetaan polaarikoordinaatistossa. Ensin haetaan telan pinnasta anturin mittaussuunnassa oleva kolmiotaso. Kyseisen tason ja sen viereisen tason muodostama neliskulmainen alue täytetään 128x128 pisteen verkolla lineaarisen interpolaation avulla. Interpoloitu kohta määrittää vastaavanlaisen kolmionmuotoisiin alueisiin jaetun pinnan kuin telan pisteverkko.



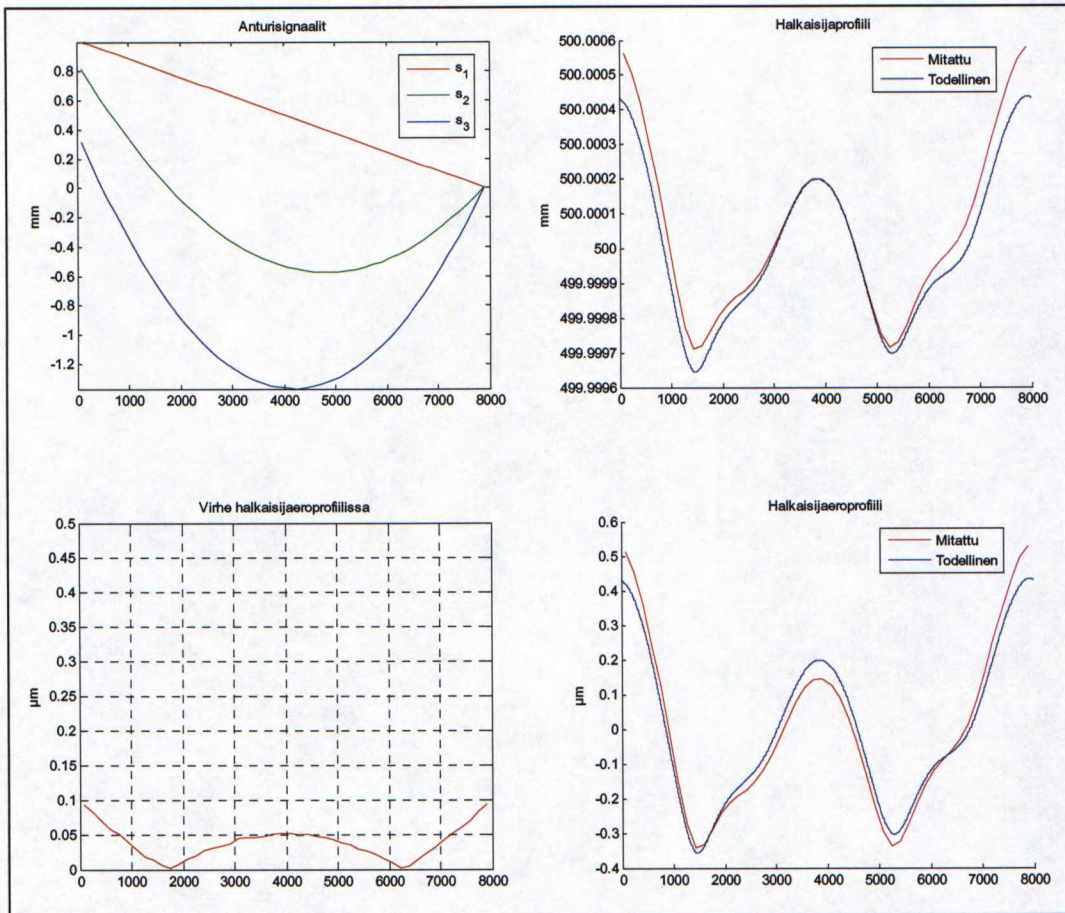
Kuva 35. Vasemmalla osa telan pisteverkkoa, oikealla mitattavaan kohtaan interpoloitu tiheämpi pisteryhmä. Havainnollisuuden vuoksi kuvan pisteverkko on huomattavasti todellista harvempi.

Sekä telaa että anturiryhmää on mahdollista siirtää tai kiertää minkä tahansa annetun suoran suhteen. Mitattavan telan nimellishalkaisija on 1000 mm ja pituus 8000 mm. Telaan on lisätty matalataajuista halkaisijavaihtelua siten, että suurimman ja pienimmän halkaisijan ero on noin 5 μm (kuva 36).



Kuva 36. Mitattavan telan halkaisijaprofiili.

Kuvan 37 vasemmassa yläkulmassa on esitetty telan pyöriessä mitatut kustakin anturisignaaleista lasketut keskiarvot. Signaaleista on nähtävissä johteen käyryys ja linjausvirhe. Kuvan oikeassa yläreunassa on signaaleista laskettu halkaisijaprofiili. Oikealla alakulmassa on vastaava halkaisijaeroprofiili. Vasemmalla alakulmassa on mitatun ja todellisen halkaisijaeroprofiilin erotus, josta keskimääräinen mittausvirhe voidaan laskea. Profiilimittauksissa telan matkalta mitattiin halkaisija 100 mm:n välein.



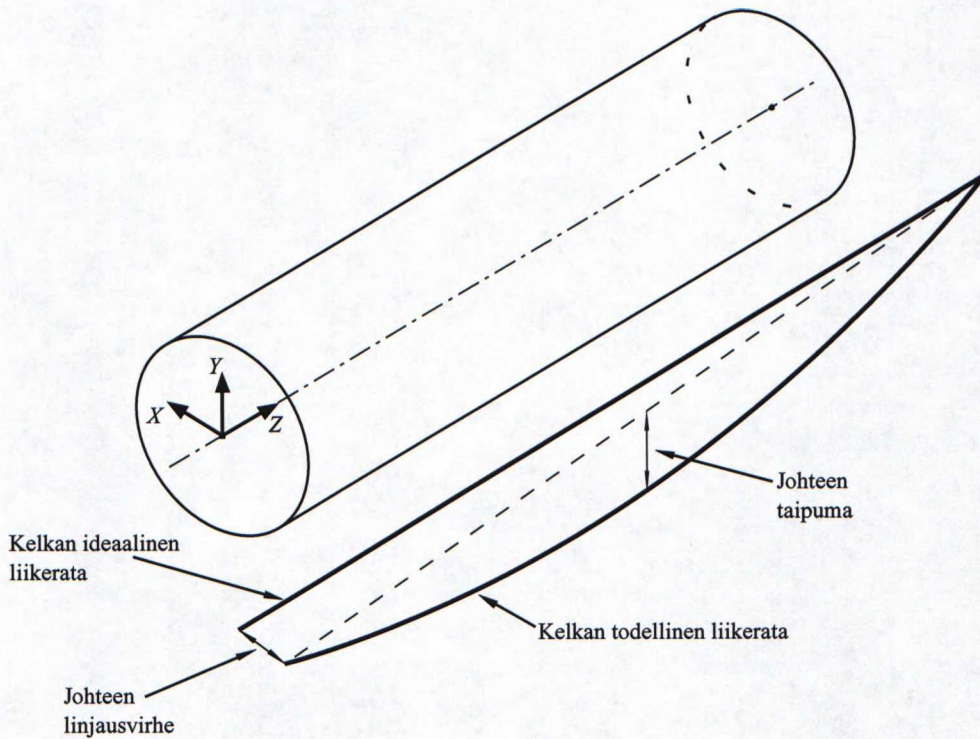
Kuva 37. Simulaatiomallilla generoidut keskimääräiset heittosignaalit (vasen yläkulma), niistä lasketut halkaisija- ja halkaisijaeroprofiilit (oikea ylä- ja alakulma), sekä mitatun profiilin virhe eri leikkausprofiileissa (vasen alakulma).

3.5 Mittausmenetelmän simulointi

Menetelmän herkkyyttä eri epätarkkuuksille tutkittiin niin sanotulla Monte Carlo -simulaatiolla, jossa mittaus suoritetaan useita kertoja siten, että tutkittavan virhekomponentin määrää muutetaan jokaisella simulaatiokerralla. Näin saatiin selville lopullisen mittausvirheen riippuvuus kustakin virhetekijästä.

Aluksi selvitettiin anturien epätarkkuuden ja käytettävien anturikulmien vaikutus mittauksen tarkkuuteen. Tarkoituksena oli selvittää, millä antureiden tarkkuudella Ozono-menetelmälle optimaalisin 67° on riittävä anturiryhmän levityskulma.

Tutkittavat virhelähteet johteen mekaanisen tarkkuuden osalta olivat kelkan x - ja y -akselin suuntaiset asemointivirheet, kelkan asemoinnin kulmapoikkeamat *yaw*, *pitch*, ja *roll*, painovoiman aiheuttama johteen taipuma sekä sen linjausvirhe mitattavan pinnan suhteen (kuva 38). Mittakaaren osalta tutkittiin anturien kulmavirheen vaikutus.



Kuva 38. Johteen taipuma tarkoittaa johteen taipumista alaspäin painovoiman vaikutuksesta. Linjausvirheessä johde ei ole samansuuntainen mitattavan telan kanssa.

Lisäksi telan pyörimiskeskiön liikkeen vaikutus tutkittiin liikuttamalla telan päätyjä vastakkaisvaiheisia ympyrä ratoja pitkin mittauksen aikana.

Kulmapoikkeamissa mittakehää kierrettiin sen kiinnityspisteen ympäri. Kiinnityspisteen etäisyys telan pinnasta on 200 mm, ja se sijaitsee pystysuunnassa telan akselin tasalla.

Koska käytettävää anturityyppiä ei tässä työssä ollut tarkoitus valita, ei anturin tarkkuusvaatimuksia selvitetty muuten kuin anturin sisäisen tarkkuuden ja

vahvistusvirheen osalta. Sisäisen epätarkkuuden vaikutusta simuloitiin lisäämällä anturisignaaleihin tasajakautunutta nollakeskiarvoista kohinaa. Käytännössä tämä tehtiin lisäämällä kuhunkin yksittäiseen mittaustulokseen tasajakautunut satunnaisluku, jolloin jakauman leveys ilmaisee anturin mittaustarkkuuden.

Anturin vahvistus- eli *gain*-virhettä simuloitiin kertomalla saatu anturisignaali vakiolla.

Anturisignaalien satunnaisvaihtelun takia saaduissa tuloksissa oli jonkin verran satunnaisvaihtelua. Tämä minimoitiin suorittamalla mittaus riittävän monta kertaa. Virhelähteen ja mittaustulokseen aiheutuvan virheen riippuvuutta esittävät kuvaajat tasoitettiin liukuvalla keskiarvolla niiden tulkitsemisen helpottamiseksi.

3.6 Halkaisijaeroprofiilin ja mittausrvirheen laskeminen

Valitulla menetelmällä pystytään mittaamaan kappaleen halkaisija. Telan halkaisijaprofiili muodostetaan mittaamalla sen halkaisija z -akselin eri kohdista.

Halkaisijaprofiili \mathbf{D} sisältää kappaleen halkaisijat mittauspisteissä i :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix} \quad (37)$$

Koska tavoitteena on saada selville pelkkä halkaisijaeroprofiili, ei halkaisijoiden absoluuttisella tarkkuudella ole merkitystä. Halkaisijaprofiilista saadaan halkaisijaeroprofiili $\Delta\mathbf{D}$ vähentämällä halkaisijaprofiilista sen keskiarvo:

$$\Delta\mathbf{D} = \mathbf{D} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i \quad (38)$$

Mittauksen tarkkuuden selvittämiseksi mitattua halkaisijaeroprofiilia verrataan telan todelliseen halkaisijaeroprofiiliin. Mittausvirhe on ilmoitettu sekä maksimivirheenä, että keskimääräisenä virheenä. Maksimivirhe on mitatun ja todellisen profiilin välillä oleva suurin ero:

$$e_{\max} = \max \left\{ \left| \hat{D}_i - D_i \right| \right\}, i = 1, \dots, N \quad (39)$$

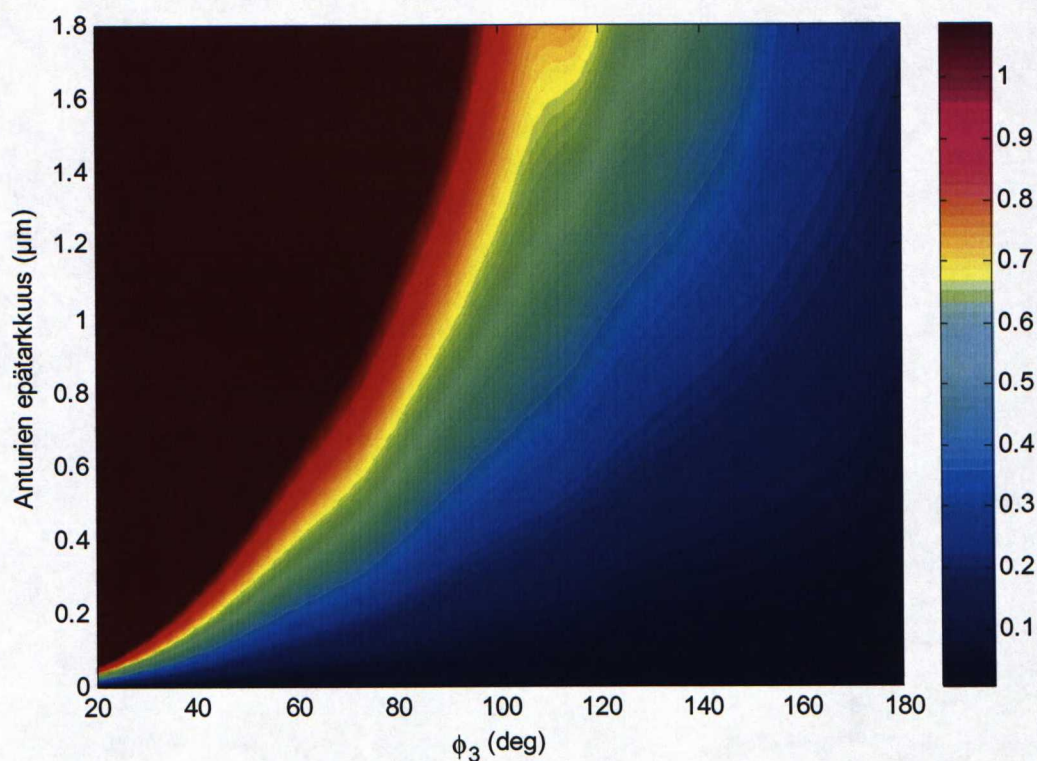
Keskimääräinen virhe saadaan vähentämällä mitatusta profiilista todellinen profiili, ja laskemalla saadun virheprofiilin itseisarvon keskiarvo:

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{D}_i - D_i| \quad (40)$$

4. TULOKSET

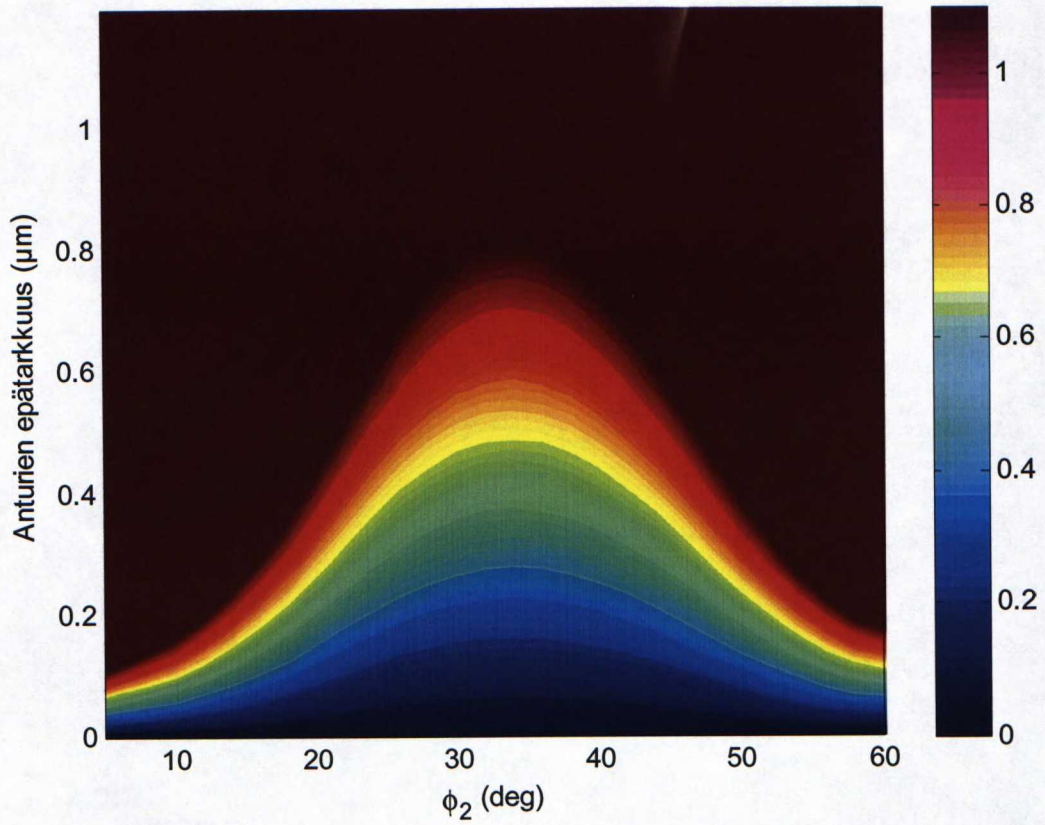
4.1 Anturointi

Menetelmän vaatiman anturiryhmän levityskulman suuruus riippuu käytettävien antureiden tarkkuudesta. Kuvassa 39 on nähtävissä menetelmällä saavutettavan tarkkuuden riippuvuus ensimmäisen ja kolmannen anturin välisestä kulmasta (ϕ_3) ja anturien tarkkuudesta, kun muut kulmat ovat $\phi_1 = 0^\circ$ ja $\phi_2 = \phi_3/2$. Nähdään, että käytettäessä Ozono-menetelmälle ihanteellista 67° kulmaa saavutetaan halkaisijaero-profiilin mittaamisessa $1\text{ }\mu\text{m}$:n tarkkuus, kun käytettävien antureiden tarkkuus on vähintään $0,7\text{ }\mu\text{m}$.



Kuva 39. Mitatun halkaisijaeroprofiilin keskimääräisen virheen (μm) riippuvuus käytetystä anturiryhmän levityskulmasta sekä anturien mittaustarkkuudesta.

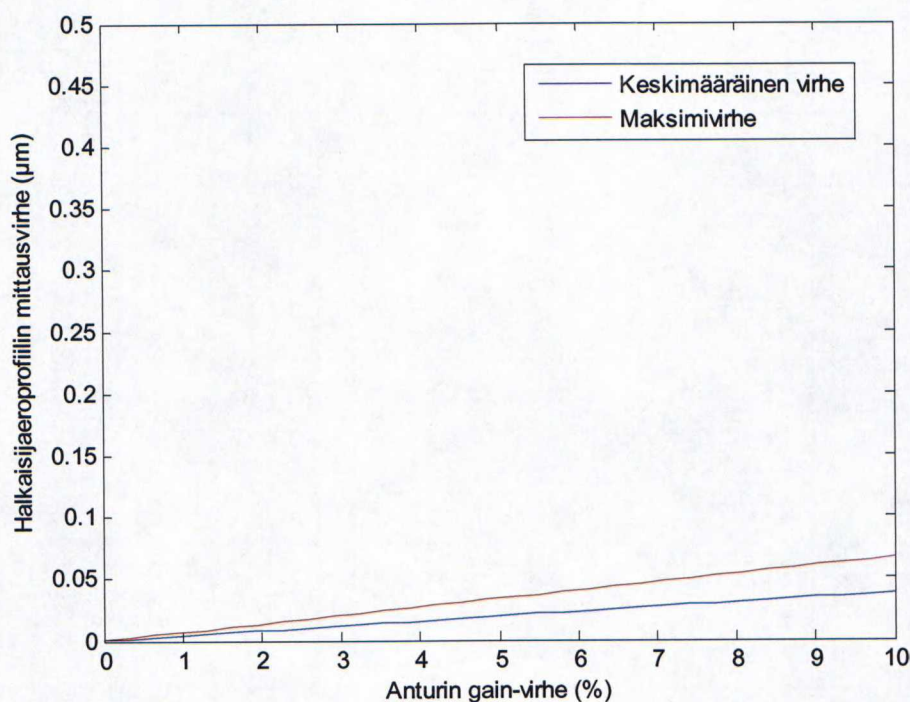
Kuvassa 40 on vastaavanlainen tarkastelu keskimmäisen anturin kulmalle, kun $\phi_1 = 0^\circ$ ja $\phi_3 = 67^\circ$. Nähdään, että tarkkuus on suurimmillaan kun $\phi_2 = \phi_3/2$. Ozono-menetelmän kannalta optimaalisin kulma $\phi_2 = 38^\circ$ antaa myös riittävän tarkan mittaustuloksen, mikäli antureiden tarkkuus on vähintään $0,7\text{ }\mu\text{m}$.



Kuva 40. Mitatun halkaisijaeroprofiilin keskimääräisen virheen riippuvuus keskimmäisen anturin kulmasta sekä anturien mittaustarkkuudesta. Kolmannen anturin kulma on 67° .

Lopuissa simuloinneissa käytettiin siten anturikulmia $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 38^\circ$ ja $\varphi_3 = 67^\circ$.

Kuvassa 41 on antureiden *gain*-virheen vaikutus mittaustarkkuuteen. Nähdään, että virhe kasvaa lineaarisesti, mutta pysyy kuitenkin hyvin pienenä varsin suurellakin vahvistusvirheellä.



Kuva 41. Antureiden *gain*-virheen vaikutus halkaisijaeroprofiilin keskimääräiseen virheeseen.

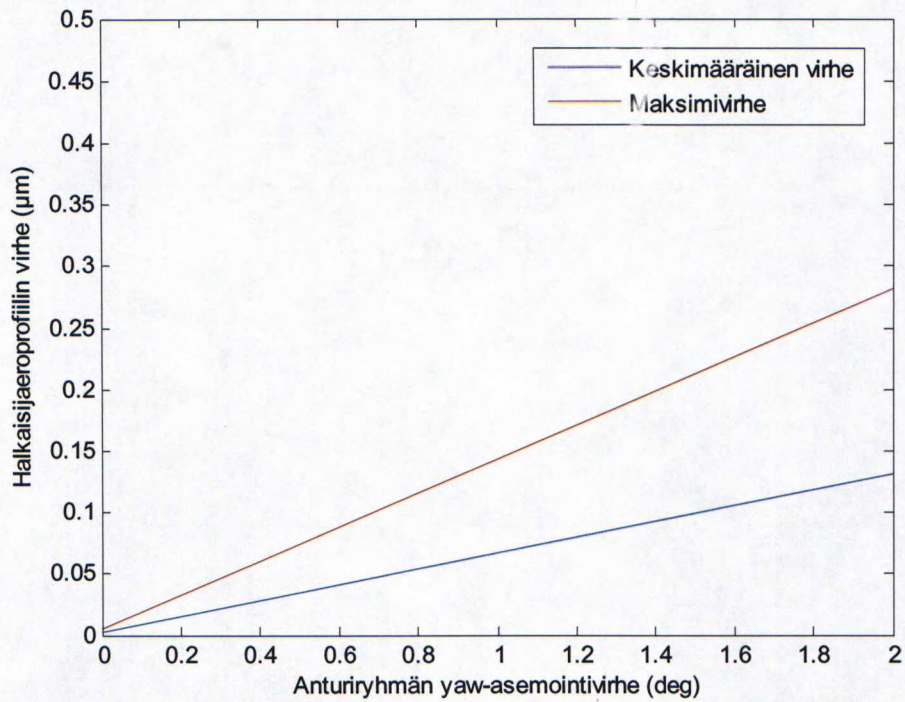
Mittaustuloksista pystytään kokonaan kompensoimaan anturikulmien epätarkkuuksien vaikutus. Mittauksella saatu absoluuttisen halkaisijan arvo riippuu vahvasti anturikulmien asemointitarkkuudesta, mutta mikäli asemointivirheet ovat vakioita koko mittauksen ajan, ei niillä ole vaikutusta mitattujen halkaisijaerojen suuruuteen.

4.2 Kelkan liikeradan epätarkkuuksien vaikutus

Absoluuttista halkaisijaa mitatessa menetelmän todettiin pystyvän kokonaan poistamaan xy -tasossa tapahtuvien mittakehän virheliikkeiden vaikutus. Toisin sanoen x - ja y - akselien suuntaisilla asemointivirheillä tai *pitch*-kierrolla ei ole vaikutusta mittaustulokseen, vaikka ne muuttuisivatkin profiilimittauksen aikana.

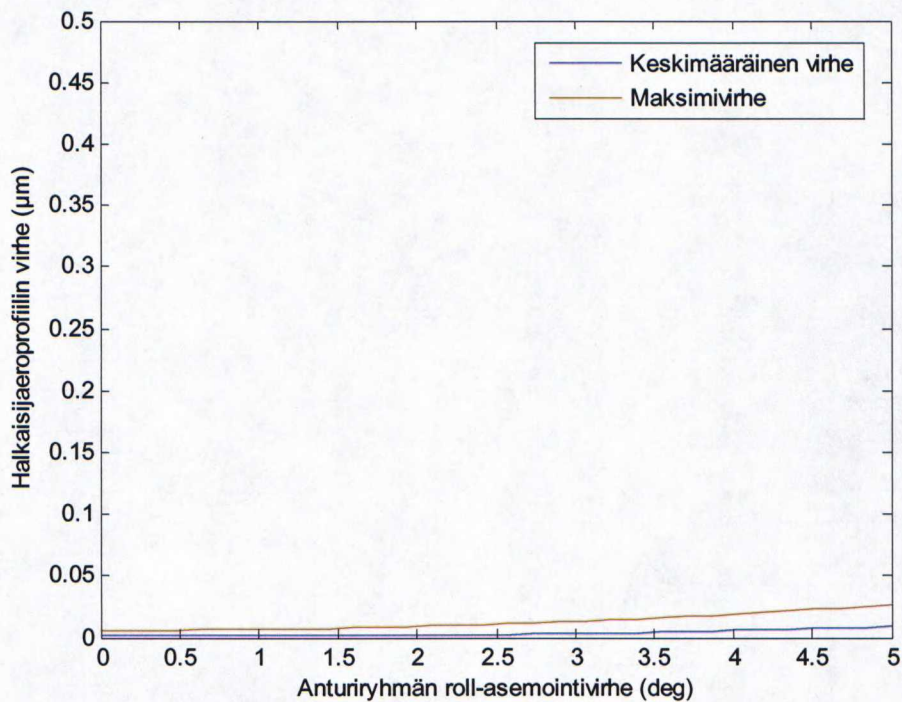
Koska telan liike mittauksen aikana tapahtuu suurimmaksi osaksi vain xy -tasossa, ei sillä ollut merkittävää vaikutusta mittaukseen.

Yaw-kulmapoikkeaman aiheuttama virhe halkaisijaeroprofiilin mittaustarkkuuteen kasvaa lineaarisesti asemointivirheen funktiona. Kuvasta 42 nähdään, että esimerkiksi 1 asteen asemointivirheellä mitatun profiilin keskimääräinen virhe on 0,06 µm.



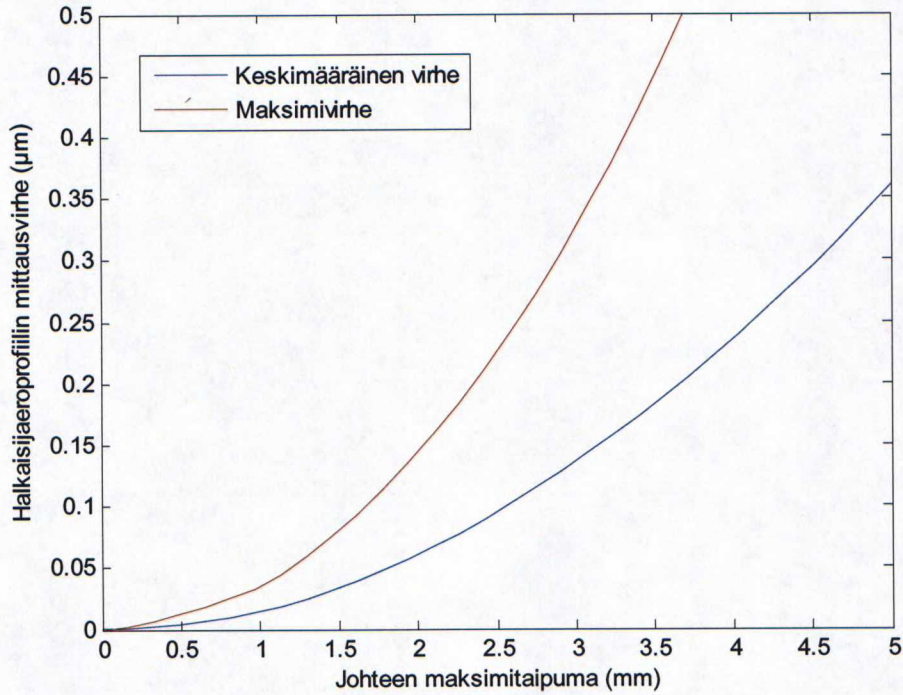
Kuva 42. Mittakehän yaw-virheen vaikutus mittaustulokseen.

Roll-virheellä on kuvan 43 mukainen, käytännössä olematon vaikutus halkaisijaeroprofiilin mittaustulokseen.



Kuva 43. Mittakehän roll-virheen vaikutus mittaustulokseen.

Johteen taipuma aiheuttaa kuvan 44 mukaisen virheen mittaukseen. Esimerkiksi johteen ollessa keskikohdaltaan 2,5 mm päätyjä alempana, aiheutuu profiili-mittaukseen 0,1 μm :n keskimääräinen virhe. Johteen linjausvirheen vaikutus halkaisijaeroprofiilin mittausrvirheeseen todettiin merkityksettömäksi.



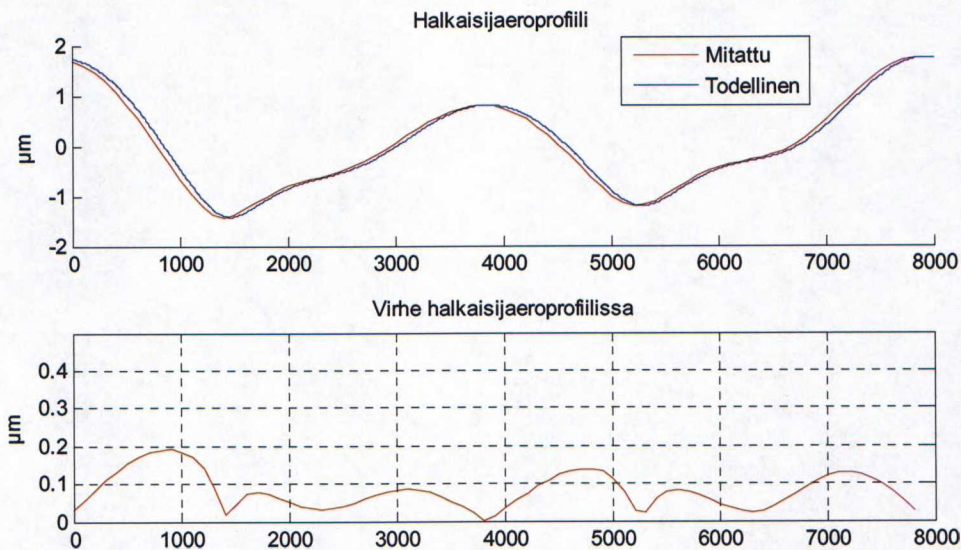
Kuva 44. Mittakehää kuljettavan johteen taipuman vaikutus mittaustulokseen.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Tulosten arviointi

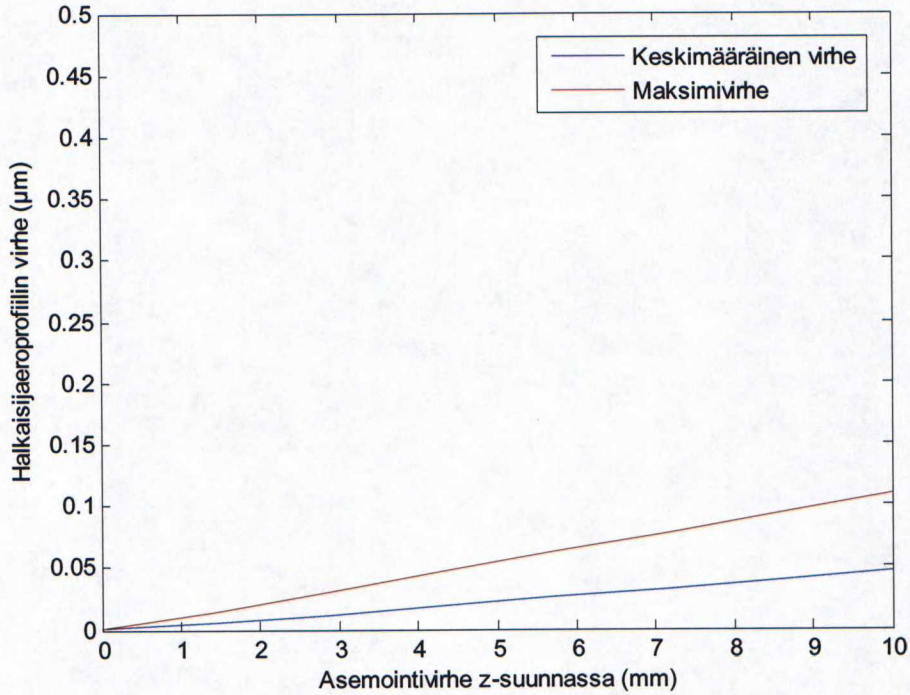
Simulaation tuloksista voidaan päätellä, että tavoitteeksi asetettu yhden mikrometrin mittaustarkkuus on saavutettavissa, kun tiettyjen virhelähteiden asettamat rajoitukset otetaan huomioon.

Yaw-, ja vähäisissä määrin myös *roll*-asemointivirhe aiheuttivat jonkin verran epätarkkuutta mittaustulokseen. Yksi syy tähän virheeseen oli asemointivirheen aiheuttama mittauskohdan siirtyminen *z*-suunnassa (kuva 45). Mitatun profiilin muoto on siis oikea, mutta se on *z*-suunnassa väärässä kohdassa. *Z*-suunnassa tapahtuvan siirtymän vaikutus halkaisijaeroprofiilin mittaustarkkuuteen on kuvassa 46.



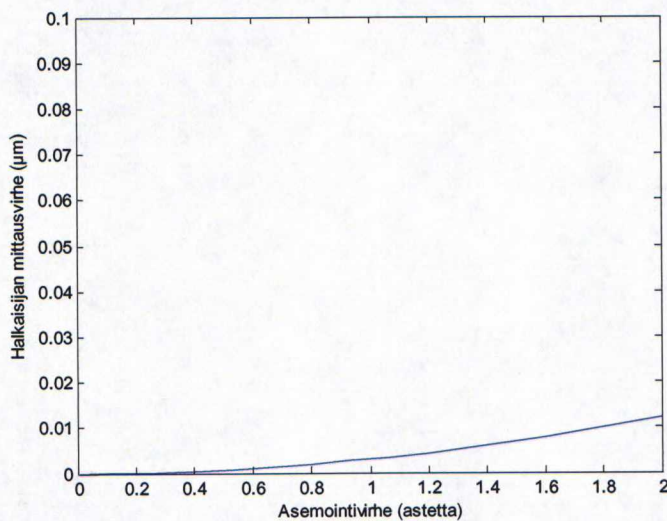
Kuva 45. Mitattu halkaisijaeroprofiili ja mittausvirhe, kun anturiryhmän *yaw*-poikkeama on $1,5^\circ$ eikä muita virhelähteitä ole.

Z-suunnassa tapahtuvan siirtymän suuruus riippuu kulmapoikkeaman suuruuden lisäksi mittakaaren kiinnityspisteen etäisyydestä mitattavaan pintaan. Siten tässä työssä ilmoitetut riippuvuudet kulmapoikkeamien ja mittausvirheen välillä pätevät vain kun kiertymispisteen etäisyys on 200 mm mitattavan telan pinnasta.



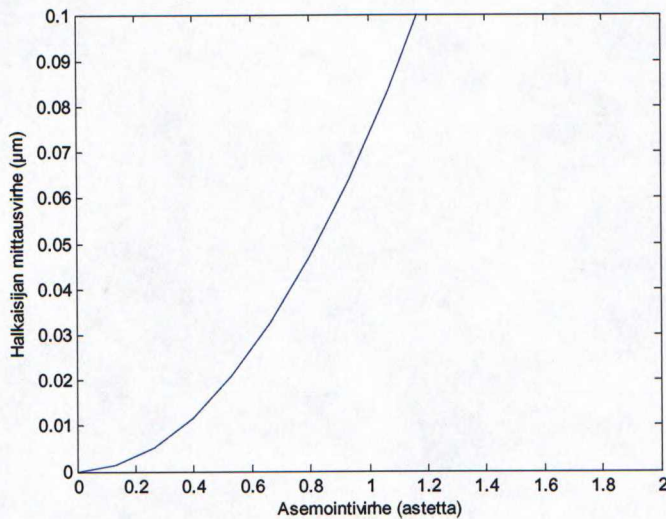
Kuva 46. Mittakaaren z-suuntaisen asemointivirheen vaikutus mittaustulokseen.

Yaw- ja *roll*-virhelähteiden vaikutus absoluuttisen halkaisijan mittaamiseen tutkittiin simuloimalla, ja niiden vaikutus on kuvissa 47 ja 48. Nähdään, että esimerkiksi 2 asteen *yaw*-poikkeamalla mitattuun halkaisijaan tulee 0,01 µm suuruinen virhe. Tästä voidaan päätellä, että *yaw*-poikkeaman osalta suurin syy halkaisijaeroprofiilin mittauseräpätarkkuuteen on mitatun profiilin z-suuntainen siirtyminen.



Kuva 47. Anturiryhmän yaw-poikkeaman aiheuttama virhe halkaisijamittaukseen.

Roll-poikkeaman aiheuttama halkaisijan mittausrvirhe on selvästi suurempi. Esimerkiksi yhden asteen asemointivirhe aiheuttaa $0,08\ \mu\text{m}$ suuruisen virheen mitatun halkaisijan arvoon. Koska halkaisijamittauksessa olevalla vakiovirheellä ei ole vaikutusta kaavalla 38 laskettuun halkaisijaeroprofiiliin, ei *roll*-virheellä ollut juurikaan vaikutusta halkaisijaeroprofiilin mittaustarkkuuteen. Huomioitavaa on, että menetelmä on herkkä *roll*-asemointivirheen vaihtelulle mittauksen aikana.



Kuva 48. Anturiryhmän *roll*-poikkeaman aiheuttama virhe halkaisijamittaukseen.

Kuten kuvasta 45 voi päätellä, on halkaisijaeroprofiilin keskimääräinen virhe monessa tapauksessa riippuvainen mitattavan telan halkaisijaprofiilin taajuusjakaumasta ja halkaisijaerojen suuruudesta. Tämän takia kaavoilla 39 ja 40 lasketut arvot keskimääräiselle ja maksimivirheelle pätevät vain tässä työssä mitatulle telalle.

Anturiryhmän *x*- ja *y*-suuntaiset asemointivirheet sekä *pitch*-asemointivirhe pystytettiin kompensoimaan jo halkaisijan mittaamisessa, jolloin ne ovat halkaisijaeroprofiilin virhelähteinä täysin merkityksettömiä. Mittapalkin linjausvirhe on yhdistelmä *x*-, *y*- ja *yaw*-asemointivirheistä, joten silläkään ei ollut huomattavaa vaikutusta lopulliseen halkaisijaeroprofiilin tarkkuuteen.

Tutkituista virhelähteistä ainoat kriittiset olivat mittapalkin taipuma ja antureiden mittaustarkkuus. Taipuma aiheuttaa anturiryhmän *y*-suuntaisen virheliikkeen lisäksi sen kallistumisen *x*-akselin ympäri. Tällöin siis anturiryhmän *roll*-poikkeama muuttuu profiilin mittauksen aikana, ja tässä työssä simuloidussa rakenteessa se on

suurimmillaan palkin päädyissä. Kuvasta 48 nähtävä *roll*-poikkeaman vaikutus halkaisijamittaukseen selittää menetelmän herkkyyden palkin taipumalle.

Taulukossa 2 on yhteenveto tutkittujen virhelähteiden vaikutuksesta mittaus-tarkkuuteen.

Taulukko 2. Yhteenveto eri virhelähteiden vaikutuksesta.

	Vaikuttaa halkaisijan mittaustarkkuuteen	Vaikuttaa halkaisijaerojen mittaustarkkuuteen
x-, y- ja pitch-asemointi- virheet	ei	ei
roll-asemointivirhe	kyllä	ei
yaw-asemointivirhe	vähän	vähän
palkin taipuma	kyllä	kyllä
palkin linjausvirhe	ei	ei
anturien vahvistusvirhe	vähän	vähän
anturien sisäinen tarkkuus	kyllä	kyllä
anturien kulmavirhe mittakaassa	kyllä	ei
telan liike	ei	ei

5.2 Simulointimallin arviointi

Suurin ongelma simulointimallin käytössä oli sen hitaus. Vaikka yksittäisen anturin yksi mittaustapahtuma saatiin suoritettua sekunnin murto-osassa, tarvittiin jo yksittäisen profiilin mittaamiseen yhteensä niin monta mittaustapahtumaa, että profiilin mittausaika oli useita kymmeniä sekunteja. Monte Carlo -simulaatio-menettelyn takia yhden virhelähteen tutkiminen vaati lukuisia profiilimittauksia.

Esimerkiksi kuvien 39 ja 40 generoimiseen tarvittiin tuhansia profiilimittauksia, jolloin niiden laskeminen vei jo muutaman tunnin. Huolellisesti etukäteen suunnitteleamalla simuloinnit oli mahdollista suorittaa eräajoina yön aikana, jolloin laskenta-aika ei muodostunut isoksi ongelmaksi.

Matlabin Profiler-työkalusta oli huomattava apu mallin nopeuden optimoimisessa. Se näyttää ohjelman kunkin rivin suoritusajan, sekä ehdottaa koodiin parannuksia laskennan nopeutta ajatellen.

Kaiken kaikkiaan simulointimallin käyttäminen menetelmän herkkyyden tutkimiseen oli varsin kätevää.

5.3 Jatkotutkimuskohteet

Mekaanisten virhelähteiden osalta tutkimatta jäi ainakin mitattavan telan ympyrämaisyysvirheiden vaikutus mittaukseen. Riittävän pitkällä keskiarvoistamisella pystytään poistamaan telan pyörimisnopeuteen tahdistamattomien komponenttien vaikutus mittaustulokseen, mutta pyörimisnopeuteen tahdistuvien värähtelykomponenttien vaikutusta mittaukseen ei tässä työssä tutkittu.

Mittauslaitteen konstruktion suunnittelu kannattaa tehdä tässä työssä esitetyt virhelähteiden vaikutukset huomioiden. Mekaanisen konstruktion käyttäytymistä todellisuudessa on mahdollista arvioida esimerkiksi muodostamalla sen kinemaattisen ketjun poikkeamabudjetit [1].

Mittauksessa käytettävän anturityypin valinta on yksi selkeä jatkotutkimuskohde. Tässä työssä anturin epätarkkuuksien vaikutus tutkittiin melko yksinkertaistetusti. Todellisuudessa etäisyyttä mittaavilla antureilla on tyypistä riippuen monia erilaisia epäideaalisuuksia, kuten epälineaarisuutta ja hystereesiä [5]. Anturin mittausnopeus on myös yksi anturivalintaan tekijä, koska telan pinnan nopeus voi olla jopa yli 2000 m/min.

Lopullisen mittausjärjestelmän vaatimuksista ja rajoituksista riippuen myös muiden tässä työssä esitettyjen mittausmenetelmien soveltuvuus halkaisijaeroprofiilin mittaamiseen saattaa olla tutkimisen arvoista.

6. YHTEENVETO

Viime vuosikymmeninä merkittävimmät keinot paperikoneiden tuotantokapasiteetin kasvattamiseksi ovat olleet koneiden nopeuden nostaminen ja leveyden kasvattaminen. Jotta leveyden kasvattamisesta saataisiin maksimaalinen hyöty, on tärkeää että kone pystyy tuottamaan tasalaatuista paperia koko leveydeltään. Yksi vaatimus koneen poikkisuuntaisten laatuvaihtelujen minimoimisessa on, että varsinkin jälkikäsittelypään telat ovat mekaanisesti riittävän korkealaatuisia.

Ongelmana on, että telojen muoto tuotanto-olosuhteissa poikkeaa niiden alkuperäisestä muodosta. Merkittävimpiä syitä tähän ovat lämpötilan vaihteluista johtuvat muodonmuutokset, telojen pyörimisestä johtuvat kuorimuodonmuutokset sekä pidemmällä aikajänteellä tapahtuva telojen kuluminen. Paperirata kuluttaa teloja, koska monet paperissa käytettävät täyteaineet ovat kovia ja särmikkäitä. Kuluminen aiheuttaa telan halkaisijan pienenemistä, mutta kuluminen tapahtuu koneen poikkisuunnassa epätasaisesti, varsinkin telan reuna-alueilla, joissa paperiradan reunan paikka vaihtelee.

Tämän työn tavoitteena oli kehittää mittausmenetelmä, jolla telan halkaisijaprofiilin muuttumista olisi mahdollista seurata ajonaikaisesti. Telan halkaisijoiden absoluuttisia arvoja ei tarvitse mitata, vaan riittää kun telan halkaisijoiden erot saadaan mitattua. Siksi mitattavasta profiilista käytetään nimitystä halkaisijaeroprofiili.

Koska mittaus on tarkoitus tehdä tuotanto-olosuhteissa, on mittaus tehtävä telan pyöriessä. Lisäksi telan pinnasta on näkyvissä kapea sektori. Käytännössä mittaukseen olisi käytettävissä telan suuntainen päistään tuettu palkki, jossa olisi lineaarijohteella liikutettava anturiryhmä. Tuotanto-olosuhteissa erilaiset värähtelyilmiöt ovat usein merkittävä virhelähde, mutta aktiivista värähtelyn kompensointia ei tässä työssä ollut tarkoitus kehittää.

Kirjallisuudessa on esitetty runsaasti eri menetelmiä sylinterimäisen kappaleen halkaisijaprofiilin mittaamiseksi. Kuitenkin suurin osa näistä on joko tarkoitettu huomattavasti paperikoneen telaa lyhyemmille sylintereille tai mittausmenetelmää ei ole mahdollista käyttää tuotanto-olosuhteissa. Kolmen säteittäisen anturin avulla

tehtävä halkaisijamittaus valittiin tässä työssä tutkittavaksi menetelmäksi, koska se on yksinkertaisin menetelmä jolla vaaditut ominaisuudet pystytään mittaamaan.

Menetelmän testaamista varten siitä rakennettiin simulointimalli Matlab-ohjelmistolla. Mallilla pystytään generoimaan anturisignaaleja käytännön mittaustilannetta jäljittelemällä, jolloin eri virhelähteiden vaikutusta mittausvirheeseen on mahdollista tutkia. Tutkittavat virhelähteet olivat mittapalkin ja -kaaren erilaiset mekaaniset epätarkkuudet, antureiden mittausepätarkkuudet sekä mitattavan telan liike mittauksen aikana.

Menetelmän todettiin pystyvän poistamaan useimpien virhelähteiden aiheuttama mittausvirhe halkaisijan mittaamisessa. Osa virhelähteistä aiheutti halkaisijan mittaamisessa virhettä, mutta koska mitattujen halkaisijoiden eroissa ei ollut virhettä, ei kyseisillä virhelähteillä ollut juuri vaikutusta halkaisijaeroprofiilin mittausvirheeseen.

Tutkituista virhelähteistä ainoat halkaisijaeroprofiilin mittaustarkkuuden kannalta kriittiset olivat mittapalkin taipuma sekä anturien tarkkuus. Kun näiden virhelähteiden asettamat vaatimukset huomioidaan, on tavoitteeksi asetettu yhden mikrometrin mittaustarkkuus saavutettavissa.

LÄHTEET

1. Airila, M., *Mekatroniikka*. Helsinki, Otatieto, 1993. 367 s. ISBN 951-672-271-1
2. Arjas, A. (toimittanut) *Paperin valmistus, osa 2*. Turku, Suomen paperi-insinöörien yhdistys, 1983. 618 s. ISBN 951-99479-1-1
3. Aumala, O., *Mittaussignaalien käsittely*. Helsinki, Suomen Sääntöteknillinen Seura ja Insinööritieto Oy, 1981. 399 s. ISBN 951-793-394-0
4. Biermann, C.J., *Essentials of pulping and papermaking*. San Diego, Academic Press, 1993. 472 s. ISBN 0-12-097360-X
5. Doebelin, E.O., *Measurement systems: application and design*, 4th ed. Singapore, McGraw-Hill, 1990. 960 s. ISBN 0-07-017338-9
6. Elster, C., Gerhardt, J., Thomsen-Schmidt, J., Schulz, M., Weingärtner, I., *Reconstructing surface profiles from curvature measurements*. Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 2002, 113(4), s. 154-158
7. Endo, K., Gao, W., Kiyono, S., *Development of a cylindrical figure measuring instrument based on a new multi-probe method*. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2003, 69(4), s. 507-511
8. Endo, K., Gao, W., Kiyono, S., *A new multi-probe arrangement for surface profile measurement of cylinders*. JSME International Journal Series C, 2004, 46(4), s. 1531-1537
9. *Exploring Roundness. Fundamental guide to the measurement of cylindrical form*. Taylor Hobson Ltd, 2006
10. Gao, W., Kiyono, S., *High accuracy profile measurement of machined surface by the combined method*. Measurement, 1996, 19(1), s. 55-64
11. Gao, W., Kiyono, S., *On-machine profile measurement of machined surface using the combined three-point method*. JSME International Journal Series C, 1997, 40(2), s. 253-259
12. Gao, W., Yokoyama, J., Kojima, H., Kiyono, S., *Precision measurement of cylinder straightness using a scanning multi-probe system*. Precision Engineering, 2002, 26(3), s. 279-288

13. Gao, W., Kiyono, S., Satoh, E., Sata, T., *Precision measurement of multi-degree of freedom spindle errors using two-dimensional slope sensors*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2002, 51(1), s. 447-450
14. Gao, W., Arai, Y., Shibuya, A., Kiyono, S., Park, C.H., *Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage*. Precision Engineering, 2005, 30, s. 96-103
15. Haikio, J., *Sorvausjärjestelmä telan geometriavirheen pienentämiseksi*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, Espoo, 1997. 79 s.
16. Jokio, M. (toimittanut), *Papermaking science and technology. Book 10, Papermaking part 3, Finishing*. Helsinki, Fapet Oy, 1999. 361 s. ISBN 952-5216-10-1
17. Juhanko, J., Pullinen, J., Kuosmanen, P., *Paperikoneen päällystysaseman vastatelan dynaamisesta käyttäytymisestä. Raippa-projektin loppuraportti*. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Espoo, 1999. 88 s.
18. Julkunen T. *Paperikoneen telarakenteet*. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto, Koneensuunnittelun laitos. Linnanmaa, Oulu. 1980. 158 s.
19. Karlsson, M. (toimittanut), *Papermaking science and technology. Book 9, Papermaking part 2, Drying*. Helsinki, Fapet Oy, 2000. 496 s. ISBN 952-5216-09-8
20. Kato, H., Nakano, Y., Nomura, Y., *Development of in-situ measuring system of circularity in precision cylindrical grinding*. Bulletin of the Japan society for precision engineering, 1990, 24(2), s. 130-135
21. Kivioja, S., Kivivuori, S., Salonen, P., *Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu*. Espoo, Otatieto Oy, 1997. 351 s. ISBN 951-672-240-7
22. Kiyono, S., Huang, P., Fukaya, N., *Datum introduced by software methods*. Proceedings of the International Conference of Advanced Mechatronics, Tokyo, 1989, s. 467-472
23. *KnowPap -verkkomateriaali*. <http://www.knowpap.com>, haettu 16.11.2009
24. Kuosmanen, P., Väänänen, P., *Menetelmä ja järjestelmä kappaleen ympyrämuotoisuuden mittaukseen*. Patenttihakemus nro FI934059, 1993, 12 s.

25. Lehtinen, E. (toimittanut), *Papermaking science and technology. Book 11, Pigment coating and surface sizing of paper*. Helsinki, Fapet Oy, 2000. 810 s. ISBN 952-5216-11-X
26. Mattila, S., *Telamittalaitteen kehittäminen*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, Espoo, 2003. 109 s.
27. Metso Automation, *IQAquaPro* -verkkomateriaali. <http://www.metso.com>, haettu 23.2.2009
28. Muralikrishnan, B., Raja J., *Computational Surface and Roundness Metrology*. Lontoo, Springer, 2009. 263 s. ISBN 978-1-84800-296-8
29. Neimo, L. (toimittanut), *Papermaking science and technology. Book 4, Papermaking chemistry*. Helsinki, Fapet Oy, 1999. 329 s. ISBN 952-5216-04-7
30. Nyberg, T.R. (toimittanut), *Seminaariesitelmät: Ensimmäinen kansallinen nippipäivä*. Järvenpää, Valmet Oy, 1995. 151 s. ISBN 952-90-6919-7
31. Ozono, S., *On a new method of roundness measurement based on the three point method*. Proceedings of the International Conference of Production Engineering, Tokio, 1974, s. 457-462
32. Obi, M., Furukawa, S., *A study of the measuring for straightness using a sequential point method*. Journal of JSME, 1991, 57(542), s. 3197-3203
33. Paulapuro, H. (toimittanut), *Papermaking science and technology. Book 8, Papermaking Part 1, Stock preparation and wet end*. Helsinki, Fapet Oy, 2000. 461 s. ISBN 952-5216-08-X
34. Paulapuro, H. (toimittanut), *Papermaking science and technology. Book 18, Paper and board grades*. Helsinki, Fapet Oy, 2000. 134 s. ISBN 952-5216-18-7
35. Pullinen, J., *Kunnostuksen vaikutus vastatelan dynaamiseen käyttäytymiseen*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, Espoo, 1997. 81 s.
36. Ryti, N., *Paperitekniikan perusteet*. Espoo, Otakustantamo, 1970, 169 s. ISBN 951-671-304-X
37. Seppälä, M.J., Häggblom-Ahnger, U., Komulainen, P., *Paperin ja kartongin valmistus*. Helsinki, Opetushallitus, 2000. 290 s. ISBN 952-13-1280-7

38. SFS-EN ISO 1101, *Geometrisen tuotemäärittely (GPS). Geometriset toleranssit. Muodon, suunnan, sijainnin ja heiton toleranssit*. Suomen standardisoimisliitto, 2006. 116 s.
39. Weingärtner, I., Elster, C., *System of four distance sensors for high-accuracy measurement of topography*. Precision Engineering, 28(2), 2004, s. 164-170
40. Whitehouse, D.J., *Handbook of surface metrology*. Bristol, Institute of Physics Publishing, 1994. 988s. ISBN 0-7503-0039-6
41. Voith Paper, *Deflection compensating rolls -verkkomateriaali*.
<http://www.voithpaper.com>, haettu 22.2.2009.
42. Väänänen, P., *Joustavan roottorin sorvaus tarkan ympyrämuotoisuuden mittauksen ja aktiivisen värähtelyjen kompensoinnin avulla*. Lisensiaatintyö. Teknillinen Korkeakoulu, konetekniikan osasto, Espoo, 1993. 104 s.
43. Zhang, H., et al, *An on-line measuring method of workpiece diameter based on the principle of 3-sensor error separation*. Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, 1990. Vol. 3, s. 1308-1312.
44. Zi-qiang, Y., Sheng-yi, L., *High accuracy error separation technique for on-machine measuring straightness*. Precision Engineering, 2006, 30(2) s. 192-200